

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
Направление подготовки 03.04.02 Физика  
Отделение школы (НОЦ) Экспериментальной физики

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Влияние водорода на формирование структуры и деформационное поведение ультрамелкозернистого сплава системы Ti–Al–V–Mo</b>

УДК 539.2:669.788:539.3

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ91	Хованова Анастасия Олеговна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ	Степанова Екатерина Николаевна	к.т.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Киселева Елена Станиславовна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой - руководитель отделения на правах кафедры	Лидер Андрей Маркович	д.т.н., профессор		

## Запланированные результаты освоения ООП

Код	Результат освоения ООП
<b>Общекультурные компетенции</b>	
ОК-1	Способность к абстрактному мышлению, анализу, синтезу
ОК-2	Готовность действовать в нестандартных ситуациях, нести социальную и этическую ответственность за принятые решения
ОК-2	Готовность действовать в нестандартных ситуациях, нести социальную и этическую ответственность за принятые решения
ОК-3	Готовность к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
ОПК-1	Готовность к коммуникации в устной и письменной формах, на русском и иностранном языках для решения задач профессиональной деятельности
ОПК-2	Готовность руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
ОПК-3	Способность к активной социальной мобильности, организации научно-исследовательских и инновационных работ
ОПК-4	Способность адаптироваться к изменению научного профиля своей профессиональной деятельности, социокультурных и социальных условий деятельности
ОПК-5	Способность использовать свободное владение профессионально-профилированными знаниями в области компьютерных технологий для решения задач профессиональной деятельности, в том числе находящихся за пределами направленности (профиля) подготовки
ОПК-6	Способность использовать знания современных проблем и новейших достижений физики в научно-исследовательской работе
ОПК-7	Способность демонстрировать знания в области философских вопросов естествознания, истории и методологии физики
<b>Профессиональные компетенции</b>	
ПК-1	Способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта

<b>Код</b>	<b>Результат освоения ООП</b>
ПК-2	Способность свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности
ПК-3	Способность принимать участие в разработке новых методов и методических подходов в научно-инновационных исследованиях и инженерно-технологической деятельности
ПК-6	Способность методически грамотно строить планы лекционных и практических занятий по разделам учебных дисциплин и публично излагать теоретические и практические разделы учебных дисциплин в соответствии с утвержденными учебно-методическими пособиями при реализации программ бакалавриата в области физики
ПК-7	Способность руководить научно-исследовательской деятельностью в области физики обучающихся по программам бакалавриата
<b>Профессиональные компетенции университета</b>	
ДПК(У)-1	Способность планировать и проводить фундаментальные исследования в проектах в области ядерно-физических исследований, взаимодействия излучения с веществом, а также модернизация современных и создание методов изучения механических, электрических, магнитных, тепловых свойств твердых тел
ДПК(У)-2	Способность обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в профессиональной деятельности, осуществлять презентацию научной деятельности

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки (специальность) – 03.04.02 Физика  
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
 (Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
ОБМ91	Ховановой Анастасии Олеговне

Тема работы:

**Влияние водорода на формирование структуры и деформационное поведение ультрамелкозернистого сплава системы Ti–Al–V–Mo**

Утверждена приказом директора (дата, номер)      Приказ № 141-53/с от 21.05.2021

Срок сдачи студентом выполненной работы:

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

#### Исходные данные к работе

*(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).*

Объектом исследования является титановый сплав системы Ti-Al-V-Mo (марка ВТ16) в ультрамелкозернистом состоянии. Образцы сплава ВТ16 были получены методом, сочетающим предварительное наводороживание и горячее прессование. Концентрация водорода в исследуемом сплаве была различной. Исследование механических и пластических свойств проводилось при комнатной и повышенной температурах.

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Обзор литературных источников;</li> <li>– Постановка задачи;</li> <li>– Получение ультрамелкозернистой структуры в сплаве ВТ16;</li> <li>– Подготовка образцов для исследований;</li> <li>– Оптический анализ поверхности исследуемых образцов ВТ16 и ВТ16-Н;</li> <li>– Электронно-микроскопическое исследование структуры сплава ВТ16 и ВТ16-Н;</li> <li>– Исследование микротвердости;</li> <li>– Исследование механических свойств методом одноосного растяжения;</li> <li>– Анализ полученных результатов;</li> <li>– Социальная ответственность;</li> <li>– Финансовый менеджмент, ресурсоэффективности и ресурсосбережение;</li> <li>– Заключение.</li> </ul>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Антоневич Ольга Алексеевна, доцент ООД ШБИП</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Киселева Елена Станиславовна, доцент ОСГН ШБИП</p>
<p>Иностранный язык</p>	<p>Зяблова Наталия Николаевна, доцент ОИЯ ШБИП</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p><b>ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ</b></p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	
--------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Доцент ОЭФ ИЯТШ</p>	<p>Степанова Екатерина Николаевна</p>	<p>К.Т.Н.</p>		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>ОБМ91</p>	<p>Хованова Анастасия Олеговна</p>		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
ОБМ91	Ховановой Анастасии Олеговне

<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОЭФ</b>
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	03.04.02 Физика

<b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» :</b>	
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Транспортно-заготовительные расходы - 15%, амортизационные расходы - 10%, накладные расходы - 80%, районный коэффициент - 30%.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды (30,2%).
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке :</b>	
1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	1. Потенциальные потребители результатов исследования; 2. Анализ конкурентных технических решений; 3. SWOT – анализ; 4. Оценка готовности проекта к коммерциализации.
2. Разработка устава научно-технического проекта	1. Цели и результат проекта. 2. Организационная структура проекта. 3. Ограничения и допущения проекта.
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Формирование плана и графика разработки: - определение трудоемкости работ; - определение структуры работ; - разработка графика Ганта. Формирование бюджета затрат на научное исследование: - отчисления на социальные нужды; - заработная плата; - материальные затраты; - накладные расходы; - амортизационные отчисления.
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	1. Определение интегрального финансового показателя разработки; 2. Определение интегрального показателя эффективности; 3. Определение сравнительной эффективности проекта.
<b>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):</b>	
1. «Оценка конкурентоспособности технических решений 2. Матрица SWOT 3. Диаграмма Ганта 4. Оценка готовности проекта к коммерциализации 5. График проведения и бюджет НИ 6. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ	

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
-------------------------------------------------------------	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН ШБИП	Киселева Елена Станиславовна	к.э.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
ОБМ91	Хованова Анастасия Олеговна		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
ОБМ91	Ховановой Анастасии Олеговне

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	ОЭФ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	03.04.02 Физика

Тема ВКР:

Влияние водорода на формирование структуры и деформационное поведение ультрамелкозернистого сплава системы Ti-Al-V-Mo	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<p>Объект исследования: титановый сплав системы Ti-Al-V-Mo (марка BT16) в ультрамелкозернистом состоянии, полученный методом, сочетающим предварительное легирование водородом и горячее прессование.</p> <p>Рабочая зона: разрывная машина ПВ-3012М, персональный компьютер. Сплав BT16 применяется в качестве крепежных изделий в области судостроения, медицине и ракетостроении.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<p>ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.</p> <p>ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.</p> <p>ГОСТ 12.2.007.9-93 Безопасность электротермического оборудования</p> <p>ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования.</p> <p>ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.</p> <p>ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения).</p> <p>СП 2.4.3648-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и</p>

	<p>молодежи».</p> <p>Инструкция № 2-14 по охране труда при работе с электрооборудованием напряжением до 1000 В.</p> <p>Инструкция № 2-08 по охране труда при работе с ПЭВМ и ВДТ.</p>
<p><b>2. Производственная безопасность:</b></p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>Вредные факторы:</p> <p>Недостаточная освещенность рабочей зоны;</p> <p>Повышенный уровень электромагнитных излучений;</p> <p>Умственное перенапряжение;</p> <p>Повышенный уровень шума на рабочем месте;</p> <p>Перенапряжение зрительного анализатора;</p> <p>Повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны.</p> <p>Опасные факторы:</p> <p>Подвижные части производственного оборудования;</p> <p>Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека;</p> <p>Острые кромки, заусенцы и шероховатость инструментов и оборудования;</p>
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	<p>Атмосфера: выброс паров масла из фильтра пластинчато-роторного насоса;</p>
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	<p>Возможные ЧС:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- пожары вследствие короткого замыкания, возгорание/взрыв,</li> <li>- сильные морозы, диверсии,</li> </ul> <p>Наиболее типичная ЧС:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- пожар вследствие короткого замыкания</li> </ul>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
------------------------------------------------------	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Ангоневич Ольга Алексеевна	к.б.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ91	Хованова Анастасия Олеговна		



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки (специальность) – 03.04.02 Физика

Уровень образования – Магистратура

Отделение школы (НОЦ) – Отделение экспериментальной физики

Период выполнения \_\_\_\_\_ (осенний / весенний семестр 20 \_\_\_\_ /20 \_\_\_\_ учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.02.2021	Аналитический обзор литературы	15
20.02.2021	Постановка задачи и подготовка образцов к эксперименту	12
10.03.2021	Оптический анализ поверхности исследуемых образцов в исходном состоянии, электронно-микроскопическое исследование структуры сплавов ВТ16 и ВТ16-Н, исследование микротвердости	12
30.03.2021	Исследование механических свойств сплавов ВТ16 и ВТ16-Н методом одноосного растяжения при комнатной температуре	12
10.04.2021	Исследование механических свойств сплавов ВТ16 и ВТ16-Н методом одноосного растяжения в условиях сверхпластического течения	12
30.04.2021	Анализ полученных результатов	12
25.05.2021	Социальная ответственность	10
25.05.2021	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
31.05.2021	Заключение	5

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ	Степанова Екатерина Николаевна	К.Т.Н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой - руководитель отделения на правах кафедры	Лидер Андрей Маркович	д.т.н., профессор		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 157 с., 47 рисунков, 23 таблицы, 102 литературных источников, 1 приложение.

Ключевые слова: водород, структурно-фазовое состояние, ультрамелкозернистая структура, титановый сплав, деформационное поведение, сверхпластичность.

Объектом исследований являлся двухфазный ( $\alpha+\beta$ ) титановый сплав системы Ti-Al-V-Mo (марка BT16) с различной концентрацией водорода (0,15 – 0,48) мас. %.

Целью работы является исследование влияния водорода на формирование ультрамелкозернистого состояния в титановом сплаве системы Ti-Al-V-Mo с использованием интенсивной пластической деформации, а также изучение деформационного поведения и механических свойств полученной ультрамелкозернистой структуры в интервале температур (293 – 973) К.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить ряд задач: методом оптической микроскопии исследовать структуру сплавов BT16 и BT16-H; электронно-микроскопическим методом исследовать структуру сплавов BT16 и BT16-H; провести измерения микротвердости сплавов BT16 и BT16-H; провести механические испытания сплавов BT16 и BT16-H при температуре 293 К и в условиях сверхпластического течения.

В первой главе описаны методы получения ультрамелкозернистой структуры, приведены структура и механические свойства титана и его сплавов в ультрамелкозернистом состоянии.

Вторая глава преимущественно посвящена постановке задачи и методике эксперимента.

В третьей главе экспериментально изучены структура и механические свойства титанового сплава BT16 с различной концентрацией водорода в ультрамелкозернистом состоянии. Показано, что использование метода, представляющего предварительное наводороживание и горячее прессование

приводит к формированию ультрамелкозернистой структуры с меньшими энергетическими затратами и повышенными прочностными характеристиками по сравнению с нелегированным водородом ультрамелкозернистым сплавом ВТ16.

В четвертой главе рассматривается бюджет научно-исследовательской работы, ее ресурсоэффективность и ресурсосбережение.

В пятой главе описана социальная ответственность проведенного исследования.

В приложении А приведена часть диплома на английском языке.

## **Определения, обозначения, сокращения**

УМЗ –ультрамелкозернистый

ИПД – интенсивная пластическая деформация

КВД – кручение под высоким давлением

РКУП –равноканальное угловое прессование

ВП – всестороннее прессование

СП – сверхпластичность

МЗ – мелкозернистый

ЗГС – зернограничное скольжение

КЗ – крупнозернистый

ВХ – водородная хрупкость

ОКР – области когерентного рассеяния

ГЗ – граница зерна

## Содержание:

Введение .....	17
Глава 1. Теоретическая часть.....	19
1.1 Ультрамелкозернистая структура и методы ее получения.....	19
1.1.1 Деформация кручением под высоким давлением.....	19
1.1.2 Метод равноканального углового прессования.....	20
1.1.3 Всестороннее прессование со сменой оси деформации .....	22
1.1.4 Комбинированный метод, сочетающий обратимое легирование водородом и прессование .....	23
2 Структура и свойства титана и его сплавов в ультрамелкозернистом состоянии.....	25
2.1 Структурно-фазовое состояние титана и его сплавов в ультрамелкозернистом состоянии.....	25
2.2 Механические свойства ультрамелкозернистых титановых сплавов.....	33
2.3 Сверхпластичность ультрамелкозернистых титановых сплавов .....	38
3 Водород в ультрамелкозернистых титановых сплавах.....	44
Глава 2. Постановка задачи и методика эксперимента .....	52
2.1 Постановка задачи.....	52
2.2 Материалы и методы .....	53
2.2.1 Получение ультрамелкозернистой структуры.....	54
2.2.2 Подготовка образцов для исследований .....	55
2.2.3 Микроструктурные исследования.....	55
2.2.4 Рентгеноструктурный анализ.....	56
2.2.5 Микротвердость.....	57
2.2.6 Механические испытания.....	58
Глава 3. Экспериментальная часть.....	61
3.1 Структура и механические свойства титанового сплава ВТ16 в ультрамелкозернистом состоянии.....	61
3.1.1 Структура титанового сплава ВТ16 в ультрамелкозернистом состоянии..	61

3.1.2 Механические свойства титанового сплава BT 16 в ультрамелкозернистом состоянии при комнатной температуре .....	68
3.1.3 Термостабильность структуры и механических свойств ультрамелкозернистого титанового сплава BT16.....	72
3.1.4 Механические свойства ультрамелкозернистого титанового сплава BT16 при повышенных температурах.....	75
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	85
4.2 Анализ конкурентных технических решений .....	86
4.3 SWOT-анализ.....	88
4.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	89
4.5 Инициирование проекта.....	91
4.6 Планирование научно-исследовательских работ .....	94
4.7 Продолжительность этапов работ.....	96
4.8 Бюджет научно-исследовательских работ .....	100
4.9 Определение сравнительной эффективности исследования .....	106
Глава 5. Социальная ответственность .....	112
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	112
5.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства.....	112
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.....	113
5.2 Профессиональная социальная безопасность .....	114
5.2.1 Анализ вредных факторов производственной среды.....	116
5.2.1.1 Повышенный уровень шума.....	116
5.2.1.2 Повышенный уровень вибрации .....	117
5.2.1.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны.....	118
5.2.1.4 Отклонение показателей микроклимата.....	121
5.2.1.5 Статические физические нагрузки.....	124
5.2.2 Анализ опасных факторов производственной среды.....	124
5.2.2.1 Повышенная напряженность электрического поля.....	124

5.2.2.2 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может пройти через тело человека .....	125
5.3 Охрана окружающей среды.....	126
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	127
5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований .....	128
5.4.2. Разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.....	128
Заключение .....	132
Список используемой литературы: .....	133
Приложение А.....	144



## Введение

Титановые сплавы вследствие своей высокой коррозионной стойкости, биосовместимости и низкой удельной прочности являются перспективными конструкционными материалами. Эти сплавы уже в настоящее время широко используются в морском судостроении, авиакосмической промышленности, а также в медицине. Однако развитие авиакосмической и автомобильной техники требует дальнейшего повышения удельной прочности титановых сплавов. Одним из способов повышения удельной прочности титановых сплавов при невысоких гомологических температурах является формирование в них ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры (размер зерна  $d < 1$  мкм) методами интенсивной пластической деформации (ИПД) [1]. Титановые сплавы являются труднодеформируемыми материалами, поэтому для измельчения их структуры с применением деформации часто используют пластифицирующее влияние водорода [2, 3]. Присутствие водорода в титановых сплавах в процессе деформационного измельчения структуры может приводить к увеличению объемной доли  $\beta$ -фазы и перераспределению легирующих элементов, что оказывает существенное влияние на морфологию и свойства сформированной в результате деформации структуры. Поэтому существует необходимость исследования влияния водорода на формирование в титановых сплавах УМЗ структуры с применением методов ИПД.

Присутствие водорода в титановых сплавах может оказывать не только пластифицирующее, но и охрупчивающее влияние. При комнатной температуре это в основном связано с образованием гидридов [4]. При повышенных температурах (выше 623 К) гидриды полностью растворяются в титане и его сплавах. Однако свободный водород, обладающий высокой диффузионной подвижностью в металлах, может перераспределяться в объеме под действием полей упругих напряжений с накоплением и образованием пор в наиболее напряженных областях, что снижает прочность металла [5]. В случае титановых сплавов перераспределение водорода во время работы может

привести к образованию гидридов и, следовательно, к преждевременному разрушению. В настоящее время известно [6, 7], что уменьшение размеров зерен способствует увеличению скорости сорбции водорода поликристаллами. В этой связи представляется необходимым изучение влияния присутствия водорода на прочностные и пластические характеристики титановых сплавов с УМЗ структурой.

**Целью работы** является исследование влияния водорода на формирование ультрамелкозернистого состояния в титановом сплаве системы Ti–Al–V–Mo с использованием интенсивной пластической деформации, а также изучение деформационного поведения и механических свойств полученной ультрамелкозернистой структуры в интервале температур (293 – 973) К.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1 Методом оптической микроскопии исследовать структуру сплавов ВТ16 и ВТ16-Н.
- 2 Электронно-микроскопическим методом исследовать структуру сплавов ВТ16 и ВТ16-Н.
- 3 Провести измерения микротвердости сплавов ВТ16 и ВТ16-Н.
- 4 Провести механические испытания сплавов ВТ16 и ВТ16-Н при температуре 293 К и в условиях сверхпластического течения.

**Положения, выносимые в защиту:**

- 1 Закономерности формирования ультрамелкозернистой структуры в сплаве ВТ16 методом, сочетающим предварительное наводороживание и всестороннее прессования со сменой оси деформации;
- 2 Особенности развития сверхпластической деформации в ультрамелкозернистом сплаве ВТ16 в присутствии водорода, заключающиеся в повышении температуры перехода в сверхпластическое состояние и уменьшении температурного интервала проявления его сверхпластических свойств по сравнению с ненаводороженным сплавом.

## Глава 1. Теоретическая часть

### 1.1 Ультрамелкозернистая структура и методы ее получения

Существует множество способов получения УМЗ состояния в материалах, среди которых наибольшее распространение получили методы ИПД. Они позволяют получать УМЗ структуру в объемных образцах и заготовках без нарушения сплошности материала. Рассмотрим более подробно некоторые из этих методов.

#### 1.1.1 Деформация кручением под высоким давлением

Основой данного метода является метод наковальни Бриджмена [8]. Металлический образец помещается между бойками и подвергается деформации кручением под давлением в несколько ГПа (рисунок 1).

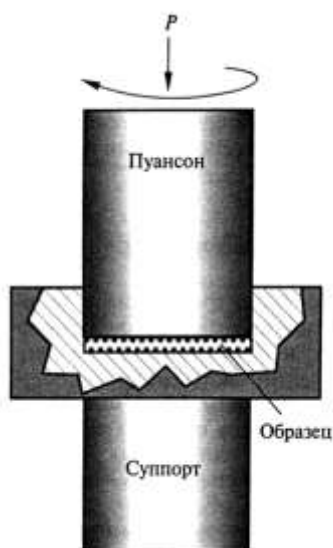


Рисунок 1 – Интенсивная пластическая деформация кручением [8]

Деформирование образца происходит сдвигом за счет вращения нижнего бойка и силы поверхностного трения. Отсюда следует, что данный

материал будет деформироваться в объеме под действием приложенного давления. В результате такого прессования, образец не разрушается

Образцы, полученные деформацией кручения под высоким давлением (КВД), имеют форму дисков диаметром около (10 – 20) мм и толщиной 1 мм. Как показывают результаты [9] исследований, для создания УМЗ структуры требуется вращение на несколько оборотов. Недостатком этого метода является малый объем материала, в котором может быть получена УМЗ структура. Кроме того, полученная структура будет неоднородной по радиусу образца. Это связано с неравномерной деформацией вдоль радиуса диска. Степени деформации образца можно рассчитать по формуле [10]:

$$\varepsilon_c = 2\pi \cdot R \cdot \frac{N}{h}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_c$  – деформация,  $R$  – расстояние от оси образца,  $N$  – число оборотов,  $h$  – толщина образца. Из формулы (1) видно, что чем больше деформация материала, тем меньше размер зерна по мере удаления от центра диска.

### **1.1.2 Метод равноканального углового прессования**

Заготовки материала при использовании метода равноканального углового прессования (РКУП) имеют достаточно большие размеры. Они представляют собой, как правило, стержни диаметром (20 – 40) мм и длиной от 100 мм до 300 мм. В специальном оборудовании через два канала с одинаково поперечными сечениями, которые пересекаются под углом 90°, продавливается заготовка (рисунок 2) [11].

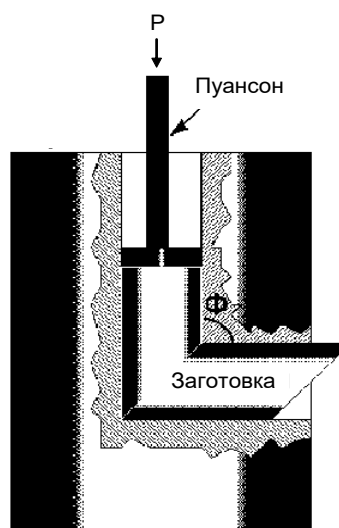


Рисунок 2 – Интенсивная пластическая деформация методом РКУП [11]

Если материал является труднодеформируемым, то деформирование происходит при повышенных температурах от 773 К до 823 К и при большем числе проходов через каналы. Число проходов заготовки через каналы в методе прессования очень важны для формирования УМЗ состояния в материалах. Так, для получения УМЗ структуры в металлических материалах необходимо минимум 4 прохода образца по каналу. Также важным является направление деформации.

Заготовки могут проходить через канал разными путями (рисунок 3). Маршрут А – направление заготовки не меняется с каждым проходом (рисунок 3, а); маршрут В – после каждого прохода заготовка поворачивается на угол  $90^\circ$  (рисунок 3, б); маршрут С - после каждого прохода заготовка поворачивается на угол  $180^\circ$  (рисунок 3, в) [12]. Эти типы маршрутов различаются ориентацией сдвига при многократных проходах образцов по каналам и приводят к изменению формы ячейки. В методе РКУП наиболее распространен маршрут В, поскольку в заготовках можно получить наиболее однородную структуру с размером зерна около (0,1 - 0,8) мкм [13].

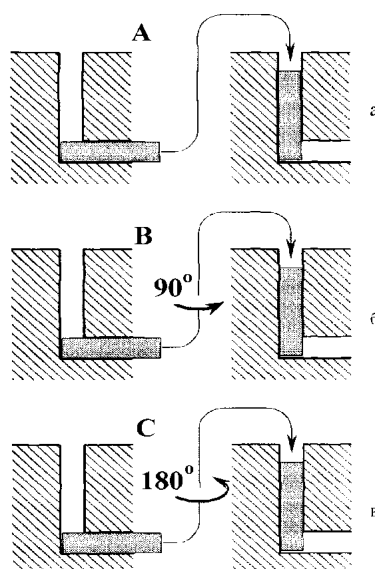


Рисунок 3 – Варианты РКУ прессования (а – маршрут А; б – маршрут В; в – маршрут С) [13]

Недостатками этого метода является наличие смазки в каналах, а также многократное повторение операции продавливания, тем самым загрязняет материал в особенности при повышенных температурах.

### 1.1.3 Всестороннее прессование со сменой оси деформации

Наиболее распространенным способом формирования УМЗ структуры в массивных заготовках является метод всестороннего прессования (ВП) со сменой оси деформации. Процесс основан на использовании многократного повторения операций: осадка с изменением оси приложенной деформируемой силы и постепенным снижением температуры (рисунок 4) [14].

Достоинством такого метода является возможность получения УМЗ состояния в достаточно хрупких материалах, а также отсутствие дорогостоящей оснастки. Размер зерен в полученной структуре не превышает 0,5 мкм [15].

Основным недостатком метода ВП является многократное повторение цикла: осадка – смена оси деформации (длительность воздействия на материал).

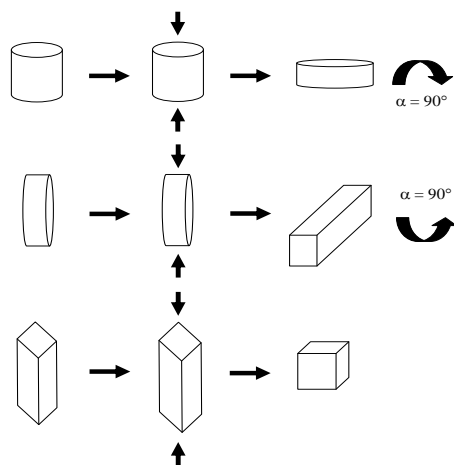


Рисунок 4 – Метод всестороннего прессования со сменой оси деформации [14]

#### 1.1.4 Комбинированный метод, сочетающий обратимое легирование водородом и прессование

Известно, что титан и его сплавы являются труднодеформируемыми, поэтому формирование УМЗ структуры в них методами ИПД требуют больших энергетических затрат. В качестве перспективного метода получения УМЗ состояния применяется метод, представляющий сочетание предварительного наводороживания и горячей пластической деформации. Данный метод основан на эффекте пластифицирующего влияния водорода на титановые сплавы.

Положительное влияние водорода на пластичность титана и его сплавов при повышенных температурах впервые было обнаружено немецкими учеными Цвиккером и Шляхером [16]. В работе слитки сплава Ti-Al насыщались водородом до концентрации 0,5 мас. %. Такие слитки удалось деформировать без образования трещин со степенью осадки 78 % при 1223 К. Образцы, которые не содержали водород, в таких условиях разрушались.

Механизм водородной пластификации обусловлен тем, что водород может снизить температуру  $\alpha \rightarrow \beta$  перехода, в результате объемная доля  $\beta$ -фазы увеличивается. Особенностью  $\beta$ -фазы является большее наличие систем скольжения, она более легко деформируется при высоких температурах [17]. В результате появляется пластифицирующий эффект и снижение

деформационных напряжений. Кроме того, водород не только может вызвать новую систему скольжения, но ещё и содействовать увеличению подвижности дислокаций и росту плотности дислокаций; приводит к тому, что большее число дислокаций будет участвовать в процессе скольжения, что облегчит процесс пластической деформации [18]. Это также содействует пластичности при высоких температурах.

Впервые использовать комбинированный метод, сочетающий обратимое легирование водородом и горячее прессование, для формирования УМЗ структуры в титановых сплавах был предложен Салищевым Г.А. с сотрудниками [19]. Позднее этот метод был усовершенствован в работе [20]. Суть данного метода показана на рисунке 5. Сначала сплав наводороживают путем отжига в водородной среде до концентрации (0,2 – 0,35) мас. %. Затем деформируют одним из методов ИПД при температурах (0,4 – 0,5) от температуры плавления титана. В результате предварительного легирования происходит снижение сопротивления материала деформированию, что способствует уменьшению энергетических затрат при получении УМЗ структуры. Далее проводят дегазацию водорода из материала посредством вакуумного отжига.

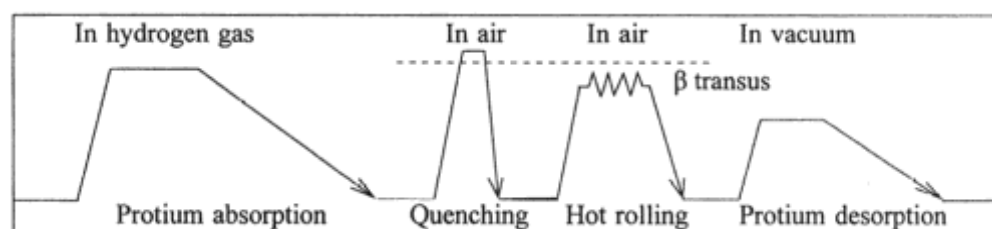


Рисунок 5 – Метод, сочетающий обратимое легирование водородом и интенсивную пластическую деформацию [20]

Недостаток метода в том, что температура дегазации водорода для некоторых материалов может превышать температуру рекристаллизации УМЗ состояния. Поэтому не всегда удастся сохранить УМЗ состояние в таких материалах в заготовках больших объемов.



## **2 Структура и свойства титана и его сплавов в ультрамелкозернистом состоянии**

Методы ИПД в зависимости от способов и режимов деформации позволяют получать в титанах и его сплавах УМЗ структуру со средним размером элементов (0,1 – 0,8) мкм. Такое измельчение структуры приводит к увеличению механических свойств этих материалов в (1,3 – 3) раза. Рассмотрим результаты некоторых имеющихся в литературе исследований структуры и механических свойств титана и его сплавов в УМЗ состоянии.

### **2.1 Структурно-фазовое состояние титана и его сплавов в ультрамелкозернистом состоянии**

Первоначально основными методами получения УМЗ структуры в металлических материалах с размером зерен (0,1 – 0,8) мкм были методы КВД и РКУП. В работе [21] на основе проведенных ряда исследований УМЗ структуры в меди и никеле была предложена следующая модель формирования УМЗ структуры в металлических материалах. На начальной стадии деформации в материале происходит деформационное упрочнение за счет увеличения плотности дислокаций. В ходе дальнейшей деформации с ростом плотности дислокаций в материале формируются стенки дислокаций и субграницы которые, взаимодействуя с решеточными дислокациями, увеличивают разориентировку до высокоугловой. Позднее аналогичное изменение структуры наблюдали в титане в процессе РКУП [22].

На рисунке 6 представлено электронно-микроскопическое изображение УМЗ структуры, сформированной в титановом сплаве марки ВТ1-0 методом РКУП за 8 проходов. Сложный деформационный контраст, не позволяющий различить отдельные элементы данной структуры, представлен на светлом поле (рисунок 6, а). В то же время на темном поле (рисунок 6, б) видно, что структура состоит из отдельных элементов. На электроннограммах этой

структуры (рисунок 6, в) рефлексы располагаются на окружностях, что говорит о наличии большеугловых разориентировок между элементами структуры. Некоторые рефлексы имеют азимутальное размытие (рисунок 6, в), что характерно для структур с высокими внутренними напряжениями. Средний размер элементов структуры титанового сплава ВТ1-0, определенный в [22] по темнопольным изображениям, в поперечном сечении полученного стержня составил  $(0,32 \pm 0,09)$  мкм, в продольном сечении  $(0,7 \pm 0,28)$  мкм. В исходном состоянии средний размер зерен титана ВТ1-0 составлял около 10 мкм.

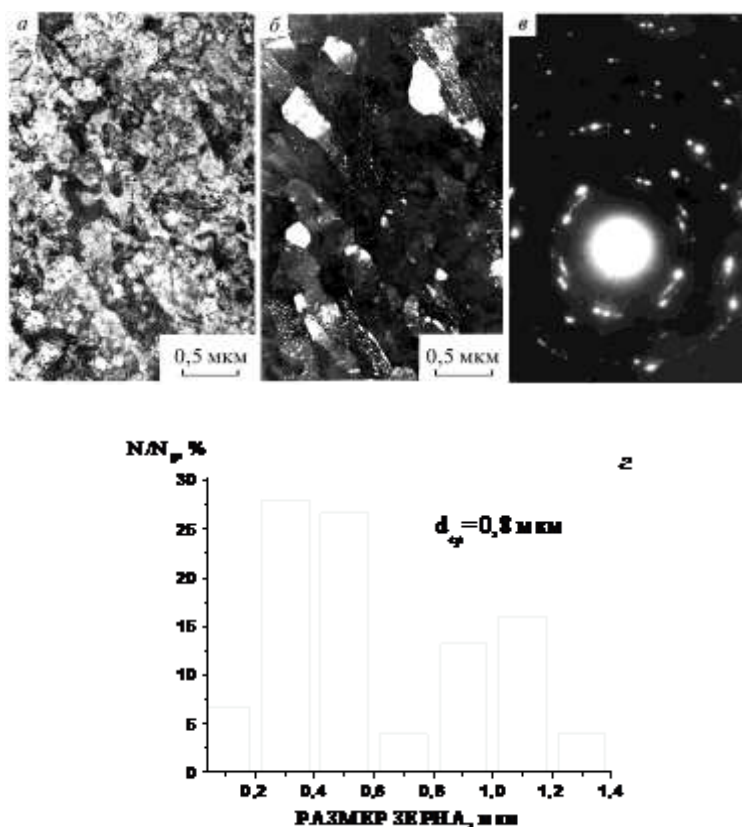


Рисунок 6 – Электроннограмма микроструктуры и гистограмма распределения элементов структуры по размерам УМЗ сплава ВТ1-0, полученного методом РКУП (а – светлопольное изображение; б – темнопольное изображение; в – картина микродифракции) [22]

При исследовании разориентации границ зерен в УМЗ титане в работе [23] было установлено, что в поперечном сечении большинство границ зерен

(до 70 %) имеют большеугловые разориентировки. В то же время в продольном сечении объемная доля большеугловых границ не превышает 50 %. Это свидетельствует о формировании в процессе РКУП в титане структурной текстуры.

Подобное изменение структуры наблюдали в титановом сплаве ВТ6 в процессе РКУП в работе [24]. Электронно-микроскопическое изображение УМЗ структуры, сформированной в сплаве марки ВТ6, после прессования представлено на рисунке 7. Метод РКУП различался углом прессования и числом проходов. Так на оснастке с углом прессования  $\varphi = 135^\circ$  при температуре 700 °С заготовки без разрушения выдерживали 12 проходов, на оснастке с  $\varphi = 120^\circ$  – 8 проходов. Видно, что после РКУП с углом прессования  $\varphi = 135^\circ$  (рисунок 7 а, б) помимо уменьшения размера зерна наблюдается появление двойников толщиной около 50 нм, расположенных внутри отдельных зерен, имеющих размер около (600 – 800) нм. На рисунке 7а рефлексy имеют азимутальное размытие, что свидетельствует о высоких внутренних напряжениях в зернах структуры. картина микродифракции (рисунок 7, в) показывает, что в структуре находится много субзерен с малоугловыми разориентировками, т.е. УМЗ структура является зеренно-субзеренной. Слабое азимутальное размытие точечных рефлексов на электронограммах (рисунок 7, в) указывают на уменьшение внутренних напряжений. Тогда как на электроннограммах (рисунок 7, г) наблюдается сильное азимутальное размытие рефлексов, указывающее на высокий уровень внутренних напряжений.

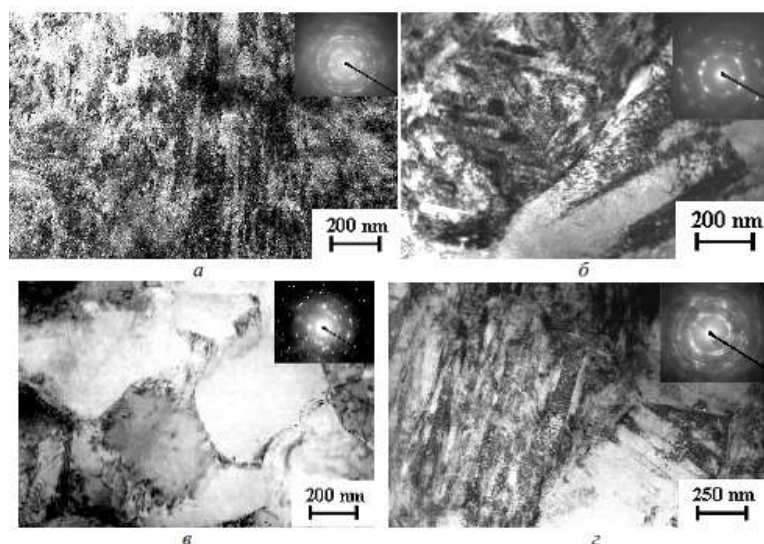


Рисунок 7 – Электронно-микроскопическое изображение титанового сплава VT6 после РКУП: а –  $\varphi = 135^\circ$ , 12 проходов, поперечное сечение;  
 б –  $\varphi = 135^\circ$ , 12 проходов; продольное сечение;  
 в –  $\varphi = 120^\circ$ , 8 проходов; поперечное сечение;  
 г –  $\varphi = 120^\circ$ , 8 проходов; продольное сечение [24]

Использование метода ВП позволяет значительно снизить неоднородность исходной структуры. Так, в [25] при формировании УМЗ структуры неоднородного сплава Ti–6Al–4V (рисунок 8, а), после ВП формируется УМЗ структура, в которой  $\beta$ -фаза равномерно распределена по всему объему (рисунок 8, б).

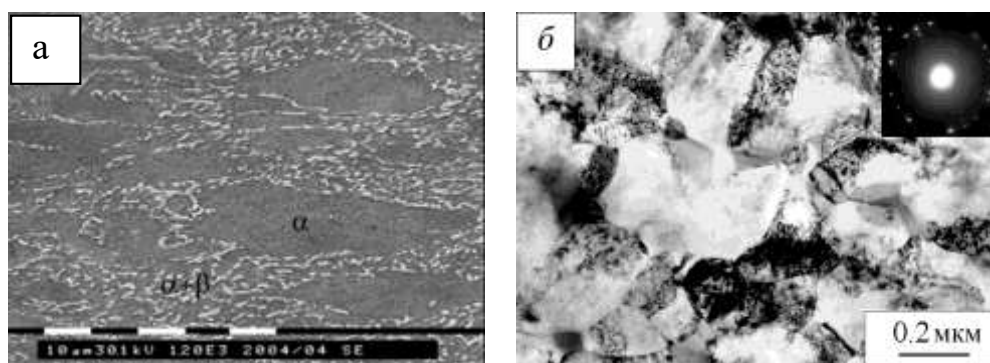


Рисунок 8 – Микроструктура сплава Ti–6Al–4V:  
 а – исходное состояние (а); б – после ИПД [25]

Недостатком УМЗ структуры, сформированной способами ВП, является зависимость однородности структуры от режимов прессования. Так, в работе [26] при изучении влияния режимов ВП на структуру титанового сплава ВТ6 было установлено, что распределение зерен может иметь значительно разный характер. На рисунке 9 видно, что гистограммы распределения зерен по размерам примерно одинаковы до 0,5 мкм. При рассмотрении гистограмм было выявлено различие в наличии единичных крупных зерен. Причину появления таких зерен пока не установили.

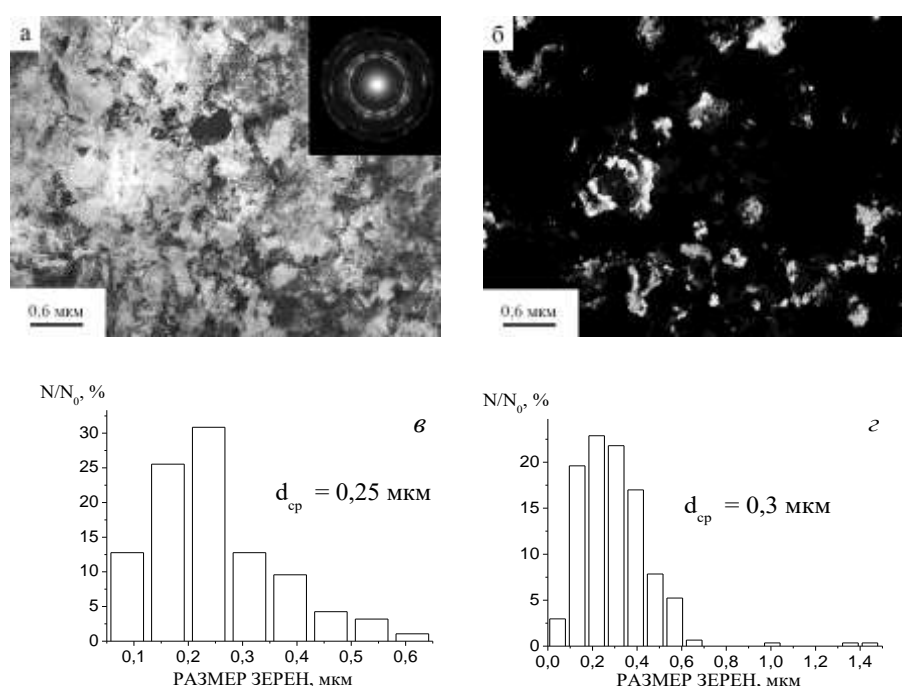


Рисунок 9 – Изображение электронной микроскопии (а, б) и гистограммы распределения элементов структуры по размерам (в, г) сплава ВТ6 после ВП:

а – светлопольное изображение; б – темнопольное изображение;

в – однородная структура; г – неоднородная структура [26]

Подробные исследования формирования УМЗ структуры в титановых сплавах на примере сплава марки ВТ16 методом ВП были проведены в работе [27]. Было установлено, что в процессе формирования УМЗ структуры в сплавах титана могут иметь место фазовые превращения  $\alpha'' \rightarrow \alpha + \beta$  и  $\beta \rightarrow \alpha$ . При

этом фазовое состояние сформированного УМЗ сплава ВТ16 определяется в основном его элементным составом и режимом ИПД.

Более подробно изменение фазового состава титановых сплавов при формировании УМЗ структуры было исследовано в работах [28, 29] при использовании метода КВД. Так, в работе [28] было установлено, что КВД сплавов Ti-Fe и Ti-Co приводит не только к измельчению зерна, но и стимулирует фазовые превращения ( $\beta \rightarrow \omega$  и  $\alpha \rightarrow \omega$ ). Исследования [29], проведенные на сплавах Ti-Fe с различным содержанием железа показали, что при низких концентрациях Fe ( $\leq 2,2$  мас. %), деформированные образцы содержали смесь только  $\alpha'$ -Ti и  $\omega$ -Ti (Fe) фаз. Стабилизация  $\beta$ -фазы титана происходит при высоком содержании железа в образцах, при этом температура фазовых переходов уменьшается. Различия между фазовыми переходами авторы объясняют разложением перенасыщенных  $\alpha'$ -Ti на  $\alpha$ -Ti и  $\beta$ -Ti фазы.

В работе [30] в сплавах Ti-Fe впервые наблюдали фазовое превращение  $\alpha' \rightarrow \omega$ , обусловленное прессованием КВД. При этом параметры решетки  $\alpha'$ -Ti уменьшались с увеличением содержания железа, аналогично параметру решетки  $\beta$ -Ti. Во время прессования  $\alpha'$ -Ti мартенсит трансформируется частично на  $\omega$ -Ti. При этом содержание  $\omega$ -фазы после деформации зависит, как правило, от концентрации железа в сплаве [31]. В сплавах, содержащих  $\beta$ -фазу, добавление железа к титану изменяет соответствие решетки между  $\beta$  - и  $\omega$  - фазами, а их наилучшее соответствие облегчает фазовые превращения. Небольшая концентрация Fe в нелегированном титановом сплаве может вызвать локальные превращения  $\beta \rightarrow \omega$ , что снижает коррозионную стойкость, и способствует возникновению хладноломкости при криогенных температурах.

В работе [32] было изучено влияние величины давления и концентрации Co на фазовый переход  $\alpha \rightarrow \omega$  в титановых сплавах Ti-Co в процессе формирования УМЗ структуры методом КВД. Было установлено, что добавление примеси Co в количестве 4 мас. % к Ti снижает границу фазового перехода относительно величины с 10,5 ГПа до 3,5 ГПа.

Как было отмечено выше, существенное влияние на способность титановых сплавов к деформированию оказывает водород. Так, в работе [33] была получена методом ВП однородная УМЗ структура (рисунок 10) в предварительно наводороженном сплаве ВТ6. При этом было установлено, что присутствие водорода позволяет снизить величину деформации, необходимую для формирования УМЗ структуры в сплаве ВТ6 в (2 – 3) раза.

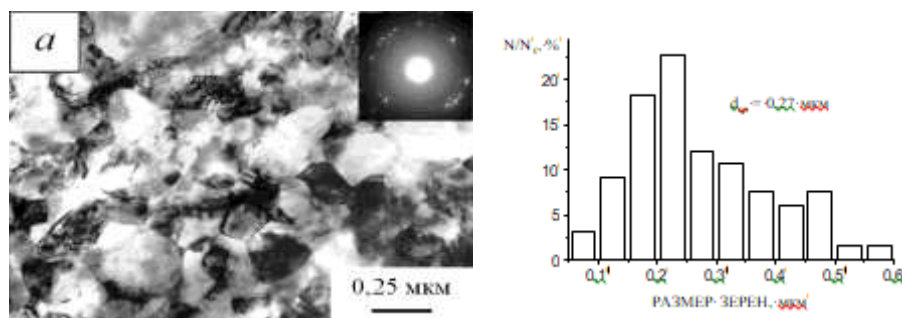


Рисунок 10 – Микроструктура (а) и гистограмма распределения зерен по размерам сплава ВТ6, полученного методом, сочетающим обратимое легирование водородом и ИПД [33]

Изучению структуры УМЗ титанового сплава ВТ6 до и после наводороживания посвящена работа [34]. В процессе прессования в титановом сплаве ВТ6 формируется неравновесная зеренно-субзеренная структура со средним размером элементов  $d = 0,29$  мкм (рисунок 11). Установлено, что образование УМЗ структуры в сплаве приводит к незначительному увеличению объемной доли  $\beta$ -фазы (до 5 об.%).

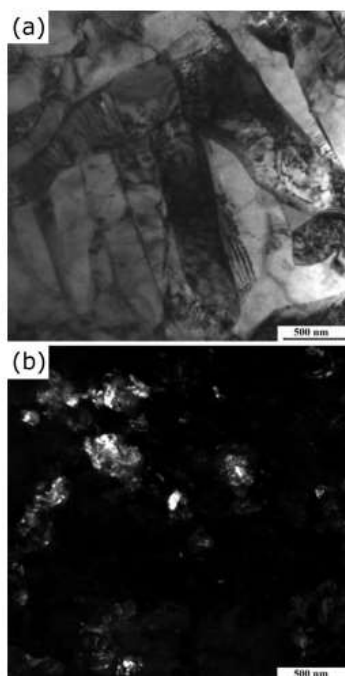


Рисунок 11 – Электронно-микроскопическое изображение сплава ВТ6:

а – светлопольное изображение ЕВМ сплав ВТ6,

б – темнопольное изображение УМЗ сплав ВТ6 [34]

Влияние водорода на структурно-фазовое состояния УМЗ титанового сплава ВТ6, полученного методом ИПД с изменением оси деформации и постепенным понижением температуры (873 – 853) К исследовали в работе [35]. Было установлено, что после деформации в сплаве ВТ6, аналогично работе [34], образуется неравновесная зерно-субзерная УМЗ структура со средним размером элементов 0,29 мкм. В присутствии в сплаве водорода ~ 0,05 мас. % наблюдается увеличение объемной доли и параметра ее кристаллической решетки  $\beta$ -фазы. Также было установлено, что в титановом сплаве ВТ6 в УМЗ состоянии после наводороживания основным типом дефектов являются дислокации, причем с ростом концентрации водорода количество таких дефектов возрастает.

Таким образом, приведенные выше данные показывают, что использование методов интенсивной пластической деформации позволяет формировать в титане и его сплавах ультрамелкозернистое состояние, дисперсность и однородность которого зависит как от способов, так и от



режимов деформации. Также интенсивная пластическая деформация приводит не только измельчению структурных элементов, но и к фазовым переходам. Это можно целенаправленно использовать для получения ультрамелкозернистой структуры с требуемым фазовым составом.

## **2.2 Механические свойства ультрамелкозернистых титановых сплавов**

Основным вопросом для практического применения является комплекс испытаний прочностных характеристик УМЗ титановых сплавов. В обзоре [36] представлены результаты многочисленных исследований, которые показывают, что уменьшение размера структурных элементов в процессе ИПД приводит с одной стороны к повышению механических свойств, таких как прочность, твердость и сверхпластичность (СП), а с другой к уменьшению пластичности и способности к деформационному упрочнению.

Так в работе [37] при исследовании влияния ИПД на механические свойства титана было установлено, что формирование УМЗ структуры приводит к повышению прочностных характеристик титана в 2 раза. Однако деформация до разрушения титана при этом уменьшилась в 2,5 раза, а однородная деформация – в 3,5 раза. Последнее свидетельствует о существенном повышении склонности титана в УМЗ состоянии к локализации пластической деформации. Подробное изучение локализация пластической деформации в УМЗ титане, проведенное в работах [38, 39] показало, что локализация пластической деформации в них проявляется в виде мезополос (ширина  $1 \div 10$  мкм) и макрополос (ширина  $300 \div 500$  мкм). При этом мезополосы пластической деформации образуются уже на стадии упрочнения кривой растяжения. Образование макрополос локализованной пластической деформации в УМЗ титане совпадало с достижением предела прочности. Стоит отметить, что локализация пластической деформации в УМЗ титане в процессе

растяжения реализовалась в интервале температур термической стабильности УМЗ структуры.

Было высказано предположение [40], что в металлических материалах с УМЗ структурой, полученной с помощью больших пластических деформаций, движение дислокаций затруднено из-за высоких внутренних напряжений в структуре. Это приводит к локализации пластической деформации и образованию полос локализованной деформации.

Несмотря на тенденцию к локализации пластической деформации, титан и титановые сплавы в УМЗ состоянии хорошо деформируются прокаткой даже при комнатной температуре [41]. При этом в материале, как правило, формируется однородная УМЗ структура большей дисперсности. На рисунке 12 представлены диаграммы растяжения титана ВТ1-0 в УМЗ (кривая 1) и в УМЗ состоянии после прокатки на 75 % (кривая 2) [41]. Видно, что прочностные характеристики, пластичность и устойчивость к локализации пластической деформации титана ВТ1-0 после прокатки на 75 % существенно выше по сравнению с УМЗ состоянием, полученным методом РКУП.

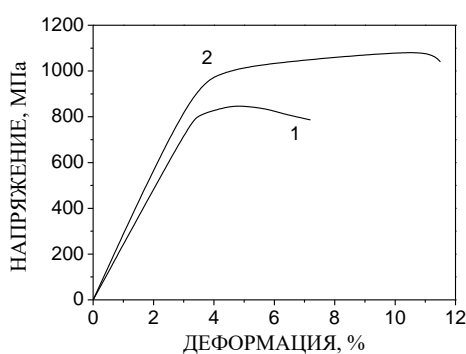


Рисунок 12 – Диаграмма растяжения УМЗ (1) и УМЗ после прокатки на 75% (2) титана ВТ1-0 [41]

Увеличение прочностных характеристик при формировании УМЗ структуры наблюдали и для сплавов титана в работе [42]. При изучении прочностных характеристик двухфазного титанового сплава ВТ6 было

установлено, что прочность сплава в УМЗ состоянии на 33 % выше по сравнению с мелкозернистым (МЗ) состоянием (1400МПа и 1050МПа соответственно). Однако пластичность и связанные с ней свойства, в том числе относительное удлинение при растяжении понизились с уменьшением размера зерна (рисунок 13). Авторы предполагают, что одной из причин снижения пластичности титана и титановых сплавов в УМЗ состоянии при растяжении являются высокие внутренние напряжения и, как следствие, повышение склонности к локализации пластической деформации.

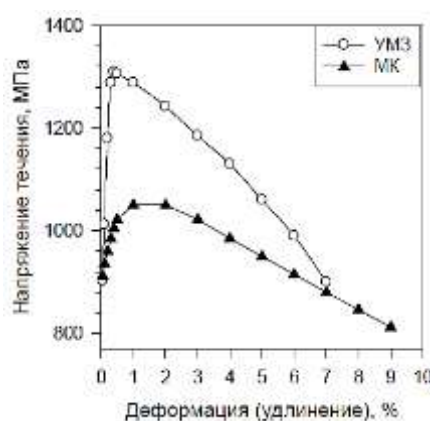


Рисунок 13 – Кривые растяжения МК и УМЗ сплава ВТ6 при комнатной температуре [42]

В работе [43] было установлено, что формирование УМЗ структуры в сплаве ВТ16 повышает его прочностные характеристики при температуре 293 К примерно на 40 % и в 2 раза снижает деформацию до разрушения по сравнению с МЗ состоянием.

Зависимость деформационного поведения и склонность к локализации пластической деформации УМЗ титана и его сплавов от наличия внутренних напряжений было исследовано в работе [44]. Было обнаружено, что предварительные дорекристаллизационные отжиги, снижающие внутренние напряжения без изменения размера структурных элементов УМЗ структуры приводят к уменьшению склонности титана и его сплавов к локализации пластической деформации. Предварительные отжиги в интервале температур

(473 – 673) К качественно не изменяют деформационный рельеф поверхности УМЗ титана. Однако плотность и степень рельефности полос локализованной деформации снижается (рисунок 14). Постепенное с увеличением температуры отжига снижение плотности и степени рельефности полос локализованной деформации и их наличие на поверхности УМЗ титана даже после отжига при температуре близкой к температуре рекристаллизации связано, по-видимому, с разной степенью неравновесности каждой границы зерна, следствием этого является растянутый по температуре и времени отжига переход всех границ зерен материала в равновесное состояние. После отжига при температуре 773 К формирование полос локализованной деформации на поверхности УМЗ титана не наблюдается. На рисунке 14 представлено изображение поверхности образцов УМЗ титана. Видно, что в отдельных зернах рекристаллизованного УМЗ титана наблюдаются дискретные линии скольжения, направление которых связано с кристаллографией зерен. Следует отметить, что в результате предварительных дорекристаллизационных отжигов, снижающих склонность к локализации деформации, происходит повышение пластических и снижение прочностных характеристик УМЗ материалов.

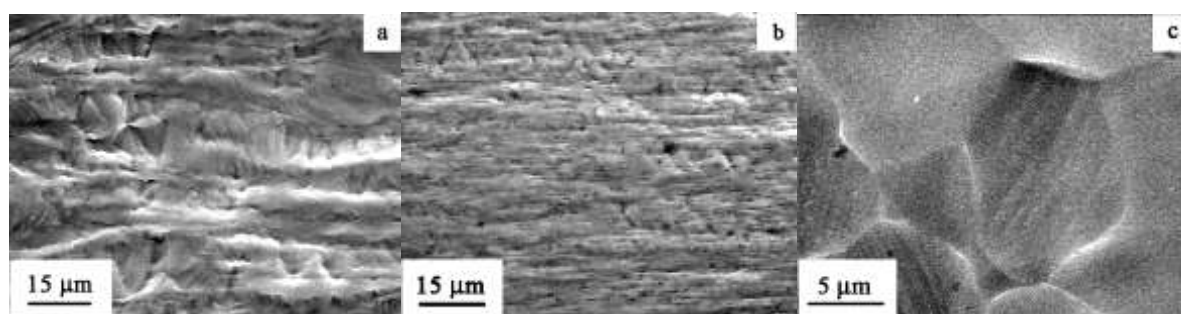


Рисунок 14 – Поверхность образцов УМЗ титана, подвергнутых растягивающему напряжению при 623 К: ЭКАП (а) и ЭКАП с последующим отжигом при 673 К (б) и 723 К (в) [44]

Подобное исследование влияния дорекристаллизационного отжига на механические свойства и структуру УМЗ титана было проведено в работе [45].

Установлено, что РКУП с последующим кратковременным отжигом при температуре 300 °С в течение 15 минут приводит процессе растяжения к увеличению предела текучести и предела прочности с 362 МПа и 450 МПа до 561 МПа и 663 МПа, соответственно. Такое увеличение прочностных характеристик авторы связывают с появлением упрочняющей текстуры титана.

Влияние дорекристаллизационного отжига на эволюцию структурно-фазового состояния двухфазного ( $\alpha+\beta$ ) УМЗ титанового сплава ВТ16 было изучено в [46]. На рисунке 15 показаны зависимости предела текучести, прочности и деформации до разрушения от времени отжига при температуре 673 К. Из рисунка 15 видно, что значения пределов текучести и прочности сплава изменяются немонотонно с увеличением времени отжига. Отжиг при температуре 673 К в течение 6 часов приводит к снижению значений пределов текучести и прочности и некоторому повышению пластичности УМЗ сплава ВТ16. Было установлено, что такое изменение прочностных и пластических характеристик сплава с увеличением времени отжига связано с фазовым переходом  $\beta \rightarrow \alpha$  и перераспределение легирующих элементов.

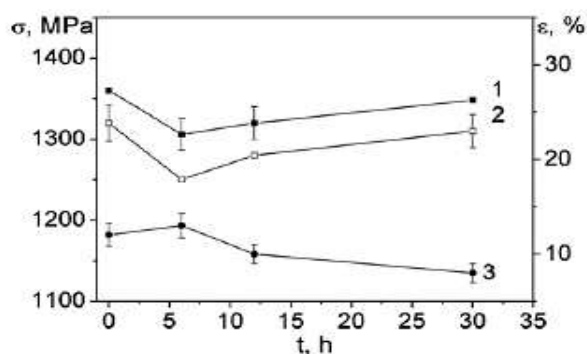


Рисунок 15 – Зависимости пределов текучести (1) и прочности (2) и деформации до разрушения (3) сплава УМЗ ВТ16 от времени отжига при 673 К [46]

Таким образом, как показывают приведенные выше результаты исследований различных авторов, формирование ультрамелкозернистой структуры методами интенсивной пластической деформацией позволяют повысить прочностные свойства титана и его сплавов при невысоких гомологических температурах. Иные свойства титановые сплавы в ультрамелкозернистом состоянии проявляют при повышенных температурах. При этом одно из основных свойств этих материалов при повышенных температурах – сверхпластичность.

### **2.3 Сверхпластичность ультрамелкозернистых титановых сплавов**

Для многих титановых сплавов с МЗ структурой существуют температурно-скоростные зависимости и режимы деформации, при которых они становятся СП. Состояние СП деформируемого материала появляется при высокой гомологической температуре и характеризуется способностью материала к аномально большим деформациям без нарушения сплошности материала. При этом необходимы 3 условия для перевода материалов в СП состояние [47]:

1 Структура – равноосное зерно с размером не более 10 мкм. Такая структура обеспечивает при температуре СП иной механизм деформации – межзеренное скольжение.

2 Температура деформации  $T = (0,7...0,85)T_{пл}$ . При  $T < 0,7T_{пл}$  подвижность зерен невелика для СП. При  $T > 0,85T_{пл}$  происходит интенсивный рост зерен, что приводит к исчезновению СП в материале.

3 Скорость деформации должна быть достаточно малой для полного прохождения диффузионных процессов и достаточно высокая, чтобы в условиях высоких температур предотвратить увеличение зерна. Для материалов с размером зерен (1 – 10) мкм оптимальные скорости деформации находятся в интервале  $(10^{-3} - 10^{-5}) \text{ с}^{-1}$ .

Известно [48], что основной вклад в величину удлинения при СП деформации при скоростях ( $10^{-3} - 10^{-5}$ )  $\text{с}^{-1}$  вносят собственное и аккомодированное зернограничное скольжение (ЗГС). Собственное ЗГС – это пластические сдвиги, локализованные в границах зерен. Аккомодированное ЗГС существенно зависят от возможности развития аккомодационных механизмов. Такими механизмами являются внутризеренное дислокационное скольжение, диффузия и фазовые превращения.

Вклад собственного ЗГС в величину удлинения увеличивается с уменьшением размера зерен материала [49]. Кроме размера зерен на развитие собственного ЗГС влияет состояние границ зерен. Повышение энергии границ зерен приводит к снижению энергии активации зернограничной диффузии и увеличению коэффициентов зернограничной диффузии, что способствует развитию собственного ЗГС [50, 51]. Вклад в величину удлинения аккомодированного ЗГС растет с уменьшением размера зерен, если аккомодация осуществляется диффузионным массопереносом [52]. В случае, когда аккомодация происходит путем внутризеренного дислокационного скольжения, вклад аккомодированного ЗГС увеличивается с уменьшением плотности дислокаций и снижением внутренних напряжений в зернах [52].

Сформированная УМЗ структура в титане и титановых сплавах методами ИПД характеризуется малым размером структурных элементов, высокой плотностью дефектов и наличием внутренних напряжений. В таких структурах активное развитие диффузии и диффузионно-контролируемых процессов, в том числе, и основного механизма СП деформации – ЗГС, наблюдается уже при умеренных температурах  $(0,4 - 0,5)T_{пл}$  [53, 54, 55]. Следовательно, в таких структурах переход в СП состояние может иметь место при более низкой и / или более высокой скорости деформации по сравнению с МЗ состоянием. Действительно, уже в первых работах по исследованию развития деформации в титановом сплаве Ti-6Al-4V с УМЗ структурой было обнаружено снижение температурного интервала проявления СП свойств на  $(150 - 200) \text{ K}$  по сравнению с МЗ состоянием ( $\sim 1173 \text{ K}$ ) [56, 57]. Существенное

снижение температуры перехода в СП состояние (до 873 К) было обнаружено и при исследовании деформационного поведения УМЗ псевдо- $\alpha$  титанового сплава Ti-4Al-2V ( $d = 0,25$  мкм) при растяжении в интервале температур (673 – 1173) К с начальной скоростью деформации  $6,9 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  (рисунок 16) [58].

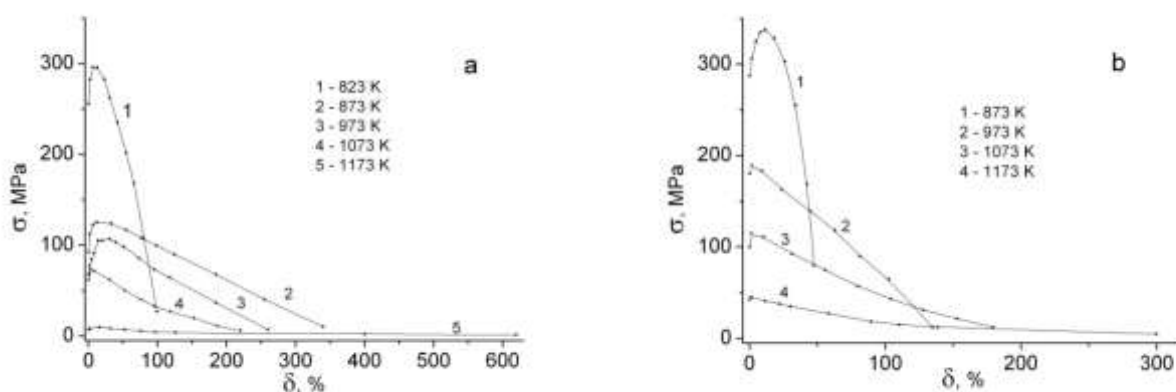


Рисунок 16 – Кривые зависимости напряжения течения от степени деформации сплава Ti-4Al-2V: а - средний размер элементов структуры 0,25 мкм; б –  $d \sim 6$  мкм [58]

Исследование влияния температуры на структурно-фазовое состояние и механические свойства УМЗ ( $d \sim 0,45$  мкм) титанового сплава системы Ti-Al-V-Mo с большим содержанием  $\beta$ -фазы было проведено в работе [43]. Установлено, что при повышении температуры испытания до 823 К УМЗ сплав системы Ti-Al-V-Mo переходит СП в (рисунок 17). В интервале температур (823 – 973) К деформация до разрушения этого УМЗ сплава увеличивается с 280 до 690 %, а предел прочности уменьшается практически на порядок от 252 до 29 МПа. Переход МЗ сплава Ti-Al-V-Mo в СП состояние происходит при температуре, превышающей 1073 К.



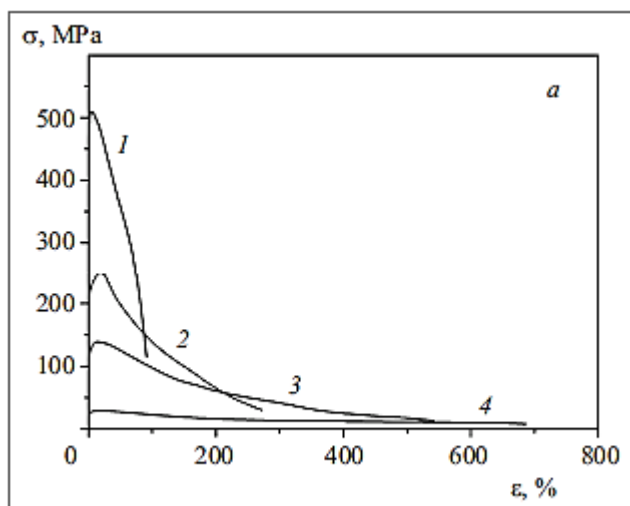


Рисунок 17 – Кривые растяжения нагрузки образцов УМЗ сплава ВТ16 в интервале температур (773 – 973) К:

1) 773 К; 2) 823 К; 3) 873 К; 4) 973 К. [43]

Как уже отмечалось выше, сформированная методами ИПД в титановых сплавах УМЗ структура характеризующейся высокой плотностью дефектов и наличием внутренних напряжений, поэтому является метастабильной. Рост зерен в титановых сплавах с УМЗ структурой часто наблюдается уже при температурах (723 – 873) К. Тогда как температура перехода в СП состояние составляет (823 – 973) К. Поэтому в процессе СП деформации титановых сплавов возможен рост зерен. Это будет снижать величину деформации, достигаемую сплавом в условиях СП течения. Так, в работе [58] при сравнительном исследовании изменения структуры псевдо- $\alpha$  титанового сплава Ti-4Al-2V в МЗ и УМЗ состояниях было установлено, что в процессе СП деформации при температуре 973 К размер зерен в МЗ состоянии остается стабильным за все время испытаний, в то время как в УМЗ состоянии – увеличивается более чем на порядок.

Однако в работе [59] при исследовании микроструктуры и деформационного поведения титанового сплава УМЗ Ti-6Al-4V в однофазном ( $\alpha$ -фаза) состоянии при СП деформации было обнаружено, что однородная равноосная УМЗ структура сплава сохранялась даже после разрушения при

растяжении. Кроме того, после деформации наблюдалось увеличение разориентации границ зерен. Это указывало на то, что СП деформация в УМЗ сплаве Ti-6Al-4V в основном осуществляется путем скольжения по границе зерна (рисунок 18).

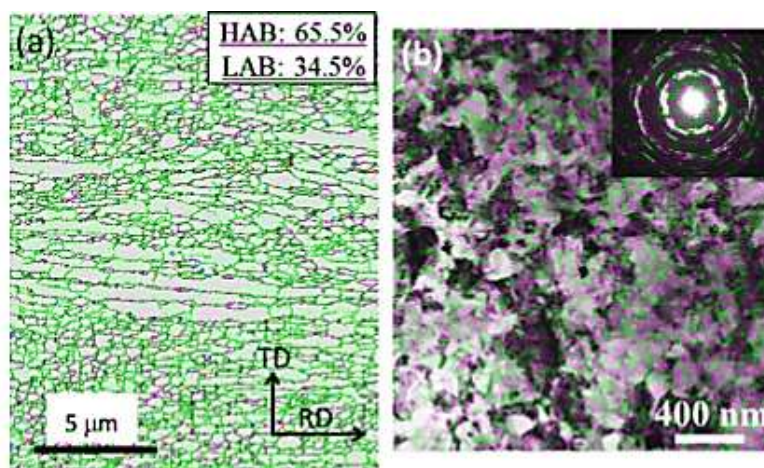


Рисунок 18 – EBSD-карта границ зерен (а) (большеугловые и малоугловые границы зерен представлены зелеными и черными линиями соответственно) и светлопольное изображение сплава Ti-6Al-4V (b) [59]

В двухфазных ( $\alpha+\beta$ ) титановых сплавах фазы  $\alpha$  и  $\beta$  имеют разную прочность. Следовательно, аккомодация ЗГС может зависеть не только от размера зерен, но и от соотношения объемных долей фаз. Поэтому соотношение объемных долей фаз может влиять на развитие СП деформации и величину деформации до разрушения. В работе [60] было исследовано влияние соотношения объемных долей  $\alpha$  и  $\beta$  фаз на развитие СП деформации на примере титанового сплава системы Ti-Al-V-Mo. Было установлено, что температура перехода УМЗ сплава Ti-Al-V-Mo в СП состояние не зависит от таких структурных характеристик, как средний размер элементов УМЗ структуры, плотность дислокаций и микроискажения кристаллической решетки  $\alpha$ -фазы, а также соотношения объемных долей  $\alpha$  и  $\beta$ -фаз. В то же время было обнаружено, что при растяжении в температурном интервале реализации СП течения в УМЗ сплаве Ti-Al-V-Mo, с отклонением фазового состава от

равновесного в сторону увеличения объемной доли  $\beta$ -фазы, имеют место такие диффузионно-контролируемые процессы, как фазовое превращение  $\beta \rightarrow \alpha$  и диффузионное перераспределение легирующих элементов, способствующие достижению большего удлинения до разрушения (рисунок 19).

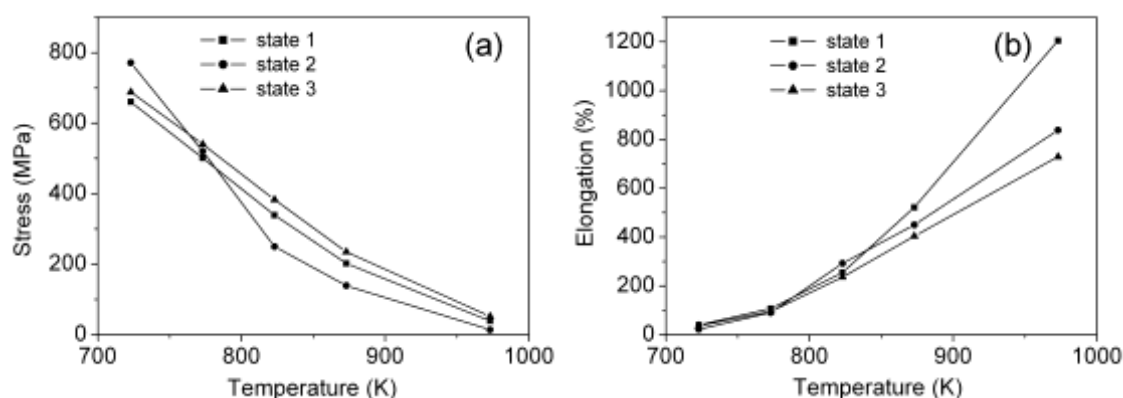


Рисунок 19 – Температурная зависимость предела прочности (а) и удлинения до разрушения (б) УМЗ сплава ВТ16 в различных состояниях:

1 –  $\beta$ -фазы – 35 %; 2 –  $\beta$ -фазы – 27 %; 3 –  $\beta$ -фазы – 24 % [60]

Таким образом, методы интенсивной пластической деформации позволяют получать в титановых сплавах ультрамелкозернистую структуру, обладающую высокими прочностными характеристиками при низких гомологических температурах. В то же время переход в сверхпластическое состояние титановых сплавов в ультрамелкозернистом состоянии наблюдается при температурах на (150 – 200) К ниже по сравнению с мелкозернистым состоянием, что открывает возможность безотходной формовки деталей из труднодеформируемых титановых сплавов.

### 3 Водород в ультрамелкозернистых титановых сплавах

Взаимодействие водорода с металлами интенсивно исследуется с 1960-х годов. С одной стороны, это обусловлено практическим интересом в использовании системы металл-водород для модификации структуры металлических материалов, аккумуляции, хранения и транспортировки водорода, и т.д. С другой стороны, это связано с нежелательным воздействием водорода на развитие процессов коррозии и разрушения металлических материалов.

Водород в зависимости от концентрации и условий деформации может оказывать пластифицирующее или охрупчивающее влияние на титан и его сплавы. Пластифицирующее воздействие водорода на титан и его сплавы связывают с развитием фазового превращения  $\alpha \rightarrow \beta$  [61]. Водород является стабилизатором  $\beta$ -фазы, поэтому наводороживание титановых сплавов приводит к увеличению объемной доли  $\beta$ -фазы и снижению ее прочности.

Результаты исследования влияние водорода на прочностные характеристики титановых сплавов в крупнозернистом (КЗ) и МЗ состояниях были изложены в монографии [17]. Было установлено, что водород может оказывать разупрочняющее и упрочняющее действие на напряжения течения и сопротивление металлических материалов пластической деформации. Такое явление зависит от фазовой области, в которой происходит деформация, так в  $\alpha$ -области наблюдается разупрочнение, а в  $\beta$ -области – упрочнение. В  $(\alpha+\beta)$ -области могут проявляться оба эффекта. Влияние водорода на напряжения течения при деформации в  $(\alpha+\beta)$ -области существенно зависит от количества  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз и их свойств, что определяется температурой деформации и концентрацией водорода в сплаве. В работе [62] авторы выводят общую закономерность соотношения прочности  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз. Было выявлено, что в титановых сплавах прочность  $\beta$ -фазы больше прочности  $\alpha$ -фазы в присутствии водорода при нормальной температуре. В условиях повышенной температуры

происходит разупрочнение, которое обусловлено развитием объемной диффузии водорода в ОЦК решетки  $\beta$ -фазы.

Как было сказано выше, охрупчивающее воздействие водорода при низких температурах связано с образованием гидридов [2, 3]. В условиях повышенных температур гидриды в металлических материалах полностью растворяются. Однако свободный водород, обладая высокой диффузионной подвижностью в металлах, может перераспределяться в объеме под действием полей упругих напряжений, образуя в наиболее напряженных участках скопления и поры, повышая тем самым водородную хрупкость (ВХ) металла.

Еще одним фактором развития ВХ металлических изделий и конструкций в процессе их эксплуатации являются инициированные водородом образование и накопление таких дефектов, как вакансионные и водород-вакансионные комплексы. Исследование закономерностей образования таких дефектов в титане и его сплавах было проведено в работах [63, 64, 65] методом позитронной спектроскопии. При исследовании влияния водорода на образование дефектов в титановом сплаве ВТ1-0 было установлено, что при концентрации водорода в количестве 0,028 мас. % образования новых дефектов в структуре сплава не происходит. При повышении концентрации водорода до 0,049 мас. % наблюдается образование вакансионных комплексов и кластеров. Дальнейшее увеличение содержания водорода в сплаве ВТ1-0 (до 0,113 мас.%) приводит к интенсивному образованию водород-вакансионных комплексов. При длительной выдержке при температуре 293 К коагулируют между собой, образуя более сложные дефекты в структуре. Процесс формирования водород-вакансионных комплексов сопровождается образованием дислокаций, а при концентрациях выше 0,5 мас. % появляются гидриды.

Исследование влияния водорода на образование дефектов в титановом сплаве системы Ti-6Al-4V в МЗ и УМЗ состояниях методом позитронной спектроскопии были проведены в работе [67]. Было установлено, что наводороживание титанового сплава в МЗ и УМЗ состоянии до концентрации 0,0215 мас. % практически не изменяет микроструктуру сплава Ti-6Al-4V.

Повышение концентрации водорода приводит к формированию в сплаве в обоих состояниях таких сложных дефектов, как вакансии-легирующие атомы и примесь-водород. С ростом концентрации водорода плотность таких дефектов возрастает. Однако основным типом дефектов в титановом сплаве Ti-6Al-4V в МЗ и УМЗ состояниях являются дислокации. При концентрации 1 мас. % в МЗ и УМЗ состоянии появляются выделения гидридов.

Таким образом, присутствие водорода в титане и его сплавах в УМЗ состоянии, как в КЗ состоянии, в зависимости от концентрации приводит к образованию дефектов и выделению гидридов.

Выше отмечалось, что уменьшение размеров зерен способствует увеличению скорости сорбции водорода металлическими материалами [68]. Следовательно, титан и его сплавы в УМЗ состоянии в одинаковых условиях эксплуатации могут поглощать большее количество водорода по сравнению даже с МЗ состоянием. Действительно, в работе [67] экспериментально было установлено, что скорость насыщения УМЗ титанового сплава Ti-6Al-4V при одинаковых условиях в 16 и 27 раз выше по сравнению с МЗ сплавом при наводораживании до 0,05 мас. % и до 1 мас. % соответственно (рисунок 20). Поэтому в ряде работ было исследовано влияние водорода не только на структуру, но и механические свойства титановых сплавов в УМЗ состоянии.

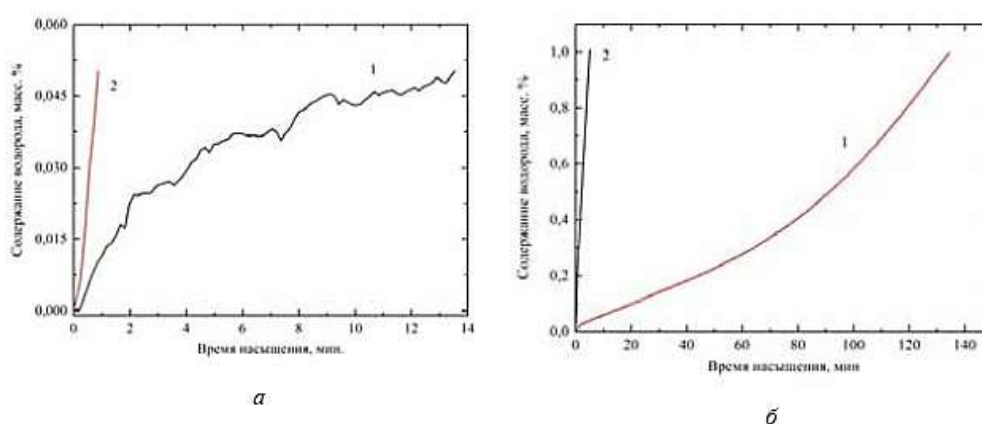


Рисунок 20 – Кривые насыщения водородом сплава Ti-6Al-4V в МЗ (1) и УМЗ (2) состояниях: а – насыщение до концентрации ~ 0,05 мас. %; б – насыщение до концентрации ~ 1 мас. % [67]

Влияние водорода на механические свойства УМЗ титанового сплава системы Ti-6Al-4V в интервале температур (293 – 1023) К были изучено в работах [69, 70].

В работе [69] было рассмотрено деформационное поведение при растяжении титанового сплава Ti-6Al-4V в КЗ и УМЗ состоянии с концентрацией водорода 0,002 – 0,24 мас. % (рисунок 21). Было установлено, что легирование водородом УМЗ сплава Ti-6Al-4V в количестве (0,005 – 0,24) мас. % при температуре 293 К подавляет локализацию пластической деформации на макроуровне, что в свою очередь приводит к увеличению протяженности стадий деформационного упрочнения и установившегося течения УМЗ сплава. Как предполагают авторы повышение устойчивости к локализации деформации при 293 К может быть связано с облегчением зарождения и увеличением подвижности дислокаций и присутствии водорода в твердом растворе.

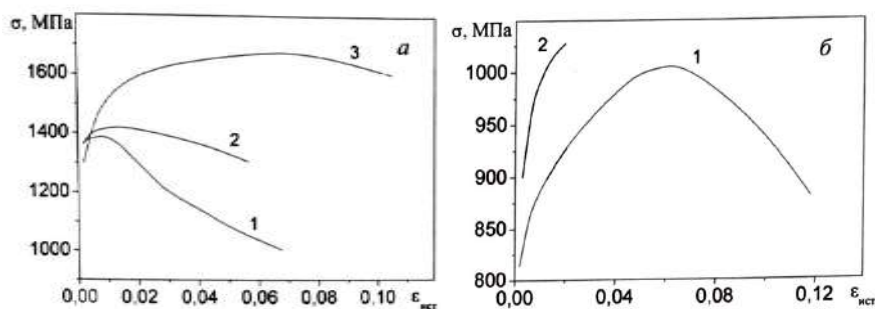


Рисунок 21 – Кривые истинное напряжение – истинная деформация УМЗ (а) и КЗ (б) сплава Ti-6Al-4V: 1) Ti-6Al-4V-0,002мас. %; 2) Ti-6Al-4V-(0,1 – 0,12)мас.% Н (водород в выделениях гидроида); 3) Ti-6Al-4V-0,1мас.% (водород в твердом растворе) [69]

Исследование механических свойств сплава УМЗ Ti-6Al-4V, полученного использованием метода, сочетающего предварительное легирование водородом и горячее прессование было проведено и в работе [70]. На рисунке 22 представлены зависимости пределов прочности, текучести и

деформации до разрушения от температуры испытания УМЗ сплава Ti-6Al-4V ( $d < 0,3$  мкм) с различным содержанием водорода. Видно, что в интервале температур (973 – 1023) К с повышением концентрации водорода наблюдается увеличение значений пределов текучести и прочности в (2 – 3) раза. Это связано с увеличением прочности  $\beta$ -фазы из-за растворения в ней водорода. На рисунке 22в представлена температурная зависимость деформации до разрушения исследуемых УМЗ сплавов Ti-6Al-4V. Видно, что в интервале температур (293 – 773) К величина деформации до разрушения увеличивается с (7 – 13) % до (60 – 110) %. При дальнейшем увеличении температуры испытаний до 1023 К вначале наблюдается резкое повышение величины до деформации, а затем – снижение. Авторы предполагают, что такое поведение сплава связано с неоднородным распределением водорода в объеме образца.

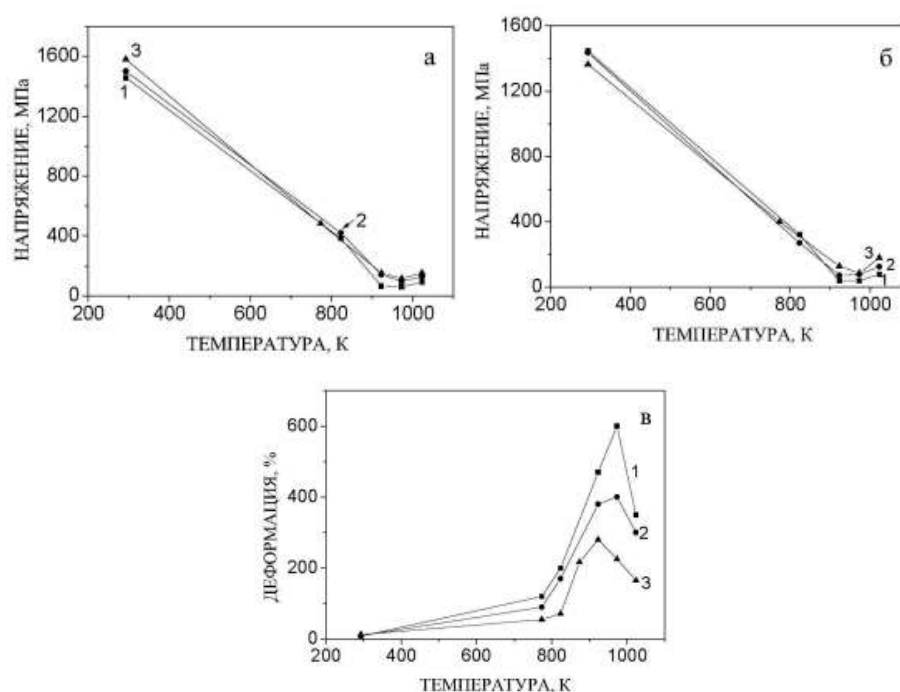


Рисунок 22 – Зависимости пределов прочности (а), текучести (б) и деформации до разрушения (в) от температуры испытания сплавов Ti-6Al-4V-0,005H (1), Ti-6Al-4V-0,08H (2), Ti-6Al-4V-0,33H (3) [70]



Особый интерес представляет вопрос о влиянии водорода на интервал и характер проявления СП свойств УМЗ титановых сплавов. Этот вопрос был рассмотрен в работах [71, 72].

В работе [71] при исследовании титанового сплава Ti-55 было установлено, что формирование УМЗ структуры снижает температуру перехода в СП состояние примерно на 125 °С. В интервале проявления СП свойств наводороживание сплава до концентраций (0,1 – 0,7) мас. % приводит к снижению предела текучести в (2 – 3) раза и увеличению деформации до разрушения в (1,3 – 1,8) раза (рисунок 23). При этом присутствие водорода не изменяет основной механизм СП деформации – ЗГС.

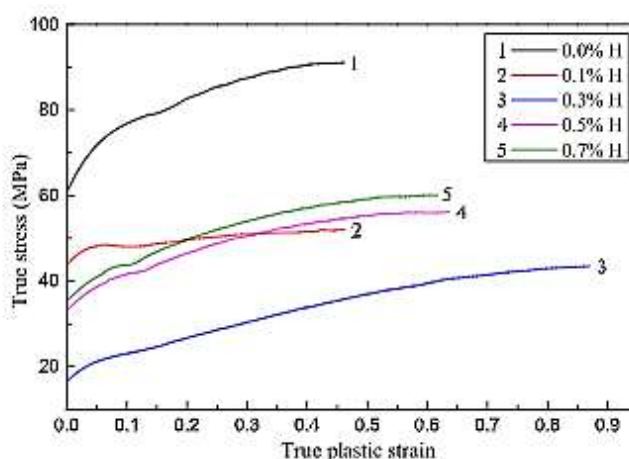


Рисунок 23 – Кривые напряженно-пластической деформации сплава Ti-55-H при  $T = 825\text{ °C}$  [71]

В работе [72] было проведено исследование влияния водорода на СП УМЗ титанового сплава ВТ6. Было установлено, что УМЗ сплав ВТ6 является СП в интервале температур (873 – 1023) К, что ниже на (100 – 150) К температуры перехода в СП состояние МЗ сплава ВТ6 [47]. Наводороживание УМЗ сплава ВТ6 до 0,4 мас. % снижает его температуру перехода в СП состояние практически на ~ 100 К (рисунок 24). Предполагается, что основным фактором снижения температуры перехода в СП состояние наводороженного сплава является увеличение объемной доли  $\beta$ -фазы.

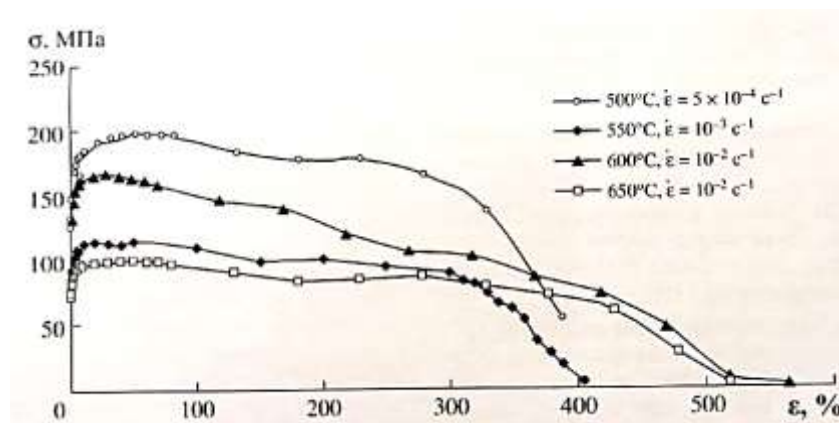


Рисунок 24 – Типичные зависимости  $\sigma - \epsilon$ , полученные при испытаниях сплава ВТ6 с содержанием водорода 0,4 мас. % в условиях СП [72]

## Вывод к главе 1

Таким образом, как видно из литературных данных использование водорода в качестве легирующей добавки позволяет получать ультрамелкозернистую структуру с использованием методов интенсивной пластической деформации с меньшими энергетическими затратами и снизить температуру перехода в сверхпластичное состояние. Однако исследование влияние водорода на механические свойства в том числе и сверхпластичные были проведены в основном на примере титановых сплавов, объемная доля  $\beta$ -фазы в которых не превышает (8 – 10) %. Между тем в некоторых высокопрочных ( $\alpha+\beta$ ) титановых сплавах содержание  $\beta$ -фазы может достигать (20 – 50) %. Известно, что в титановых сплавах водород содержится в основном в  $\beta$ -фазе. Поэтому влияние водорода на механические свойства ультрамелкозернистых сплавов с высоким содержанием  $\beta$ -фазы может иметь особенности. В этой связи важными являются исследования влияние водорода на прочностные и пластические характеристики ультрамелкозернистых титановых сплавов с высоким содержанием  $\beta$ -фазы.

## Глава 2. Постановка задачи и методика эксперимента

### 2.1 Постановка задачи

Титан и его сплавы вследствие их низкой плотности, хорошей биосовместимости и высокой коррозионной стойкости рассматриваются как наиболее перспективные материалы для медицины, авиакосмической и химической техники. Однако развитие авиакосмической и автомобильной техники требует дальнейшего повышения удельной прочности титановых сплавов. Эффективным способом повышения прочностных свойств титана и его сплавов ( $T < 0,4T_{пл}$ ,  $T_{пл}$  – температура плавления) является формирование в них УМЗ состояния [73, 74]. Кроме того, формирование УМЗ состояния позволяет на (200 – 250) К снизить температуру реализации СП состояния в сплавах титана, проявляющих при определенных условиях СП свойства [75]. Это повышает перспективу использования безотходной формовки в режиме СП для получения изделий сложной формы из сплавов титана. Как видно из литературного обзора для труднодеформируемых титановых сплавов перспективным методом получения объемных заготовок с УМЗ структурой является метод, сочетающий обратимое легирование водородом и горячую пластическую деформацию. Однако в настоящее время имеются единичные работы по исследованию формирования УМЗ структуры в титановых сплавах таким методом. Поэтому исследование влияния водорода на формирование УМЗ структуры является актуальным. Присутствие водорода в титановых сплавах оказывает существенное влияние на стабильность их структурно-фазового состояния и механические свойства [17]. Поэтому не менее актуальным является исследование влияния водорода на устойчивость УМЗ структуры и ее свойств к нагреву.

Выше отмечалось [2], что уменьшение размеров зерен способствует увеличению скорости сорбции водорода поликристаллами. Водород в зависимости от концентрации и условий деформации может оказывать

охрупчивающее влияние на титан и его сплавы, в том числе и в условиях СП. ВХ титановых сплавов обусловлена, прежде всего, выделением в структуре гидридов. При комнатной температуре предельная растворимость водорода в  $\alpha$ -фазе титана не превышает 0,002 мас. %, а в  $\beta$ -фазе – достигает 2,1 мас. % [16]. Поэтому гидриды в сплавах титана, содержащих  $\beta$ -фазу, наблюдаются при больших концентрациях водорода, чем в чистом титане. Однако присутствие водорода может приводить к ВХ сплавов титана в процессе эксплуатации даже в том случае, если его концентрация не превышает предельно допустимого значения. Это связано с тем, что водород, благодаря высокой диффузионной подвижности в металлах, может перераспределяться в объеме под действием полей упругих напряжений, образуя скопления в наиболее напряженных участках. Тем самым, увеличивается вероятность выделения гидридов и трещинообразования.

В литературе имеются данные [16], согласно которым формирование в титановых сплавах МЗ структуры повышает их сопротивление ВХ. Однако исследования сопротивления водородному охрупчиванию УМЗ структуры проведены в основном на титановом сплаве марки ВТ6. Между тем, перспектива использования титановых сплавов в УМЗ состоянии во многом зависит от их устойчивости к ВХ. Поэтому исследования влияния легирования водородом на деформационное поведение и служебные характеристики других сплавов титана в УМЗ состоянии являются актуальными.

## **2.2 Материалы и методы**

В работе для исследования был выбран двухфазный ( $\alpha+\beta$ ) титановый сплав системы Ti-Al-V-Mo с содержанием основных легирующих элементов в мас. % Al – 3.1, V – 4.5, Mo – 4.9 (далее сплав ВТ16). В нем содержится значительное количество  $\beta$ –стабилизаторов (Mo и V), поэтому объемная доля  $\beta$ -фазы в этом сплаве достигает (20 – 30) %. В состоянии поставки сплав содержит 0,002 мас. % водорода (здесь и далее концентрация водорода указана

в мас. %). Сплав ВТ16 имеет достаточно высокие прочностные характеристики и коррозионную стойкость, а также повышенную по сравнению с другими титановыми сплавами пластичность. Данные характеристики позволяют ВТ16 широко использовать для изготовления практически всех видов изделий, как правило, это проволока, детали для крепления и медицинские инструменты.

### **2.2.1 Получение ультрамелкозернистой структуры**

Для формирования УМЗ состояния в исследуемом сплаве использовали метод прессования со сменой оси деформации и постепенным понижением температуры. Прессование осуществляли на гидравлическом прессе ИП-200 со скоростью  $\sim 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Прессовали цилиндрические заготовки диаметром 20 мм и высотой 35 мм. Прессование осуществлялось за 2 цикла, один цикл – три прессования. Деформация за одно прессование  $\sim 50\%$ . Перед прессованием часть заготовок была наводорожена до концентраций: 0,15; 0,3 и 0,48 %. Наводораживание заготовок проводили в аппарате типа Сиверста при температуре 873 К и давлении 1 атм. Длительность насыщения в зависимости от требуемой концентрации водорода составляла от 6 до 30 часов. После наводораживания заготовки гомогенизировали в муфельной печи при температуре 873 К в течение 16 часов с последующей закалкой в воду. Наводороженные заготовки сплава деформировали за 2 цикла при температурах 923 и 823 К. Общая схема получения УМЗ структуры в сплаве ВТ16 с содержанием водорода (0,15 – 0,48) % представлена на рисунке 25.

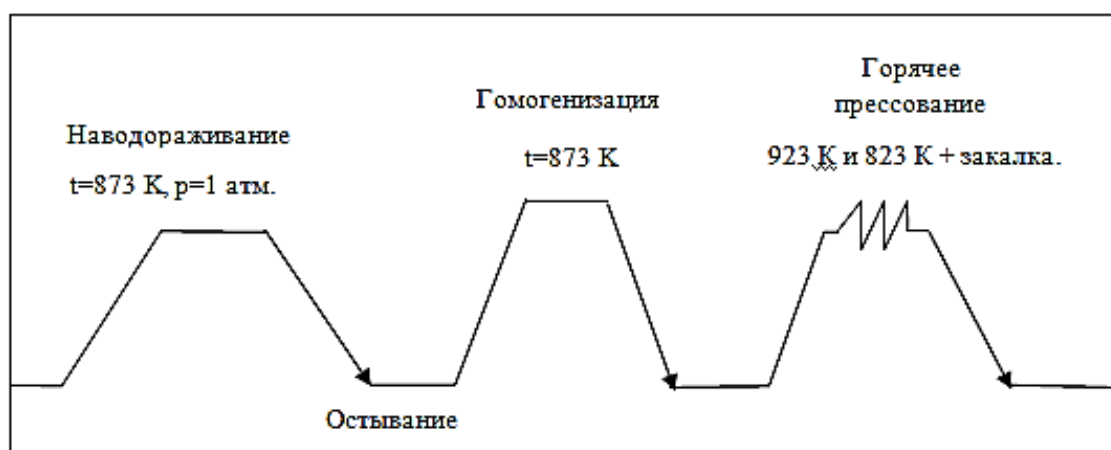


Рисунок 25 – Схема получения УМЗ структуры методом, сочетающим предварительное легирование водородом и горячее прессование

### 2.2.2 Подготовка образцов для исследований

Фольги для исследования структуры УМЗ сплава методом электронной микроскопии были приготовлены методом механического шлифования и последующей электролитической полировкой с использованием прибора «МИКРОН». Для исследования механических свойств сплава были использованы образцы в виде двойной лопатки. Поверхность образцов перед проведением испытаний подвергали механическому шлифованию и последующему электролитическому полированию. Электролитическое полирование проводили в охлажденном электролите следующего состава: 80 % ледяной уксусной кислоты и 20 % хлорной кислоты.

### 2.2.3 Микроструктурные исследования

Для изучения микроструктуры УМЗ сплава ВТ16 применялся просвечивающий электронный микроскоп марки JEM-2100. Размеры зерен определяли по темнопольным изображениям стандартным методом секущей. Средний диаметр зерна в мм вычисляли по формуле:

$$d = \frac{L}{N}, \quad (2)$$

где  $L$  – суммарная длина отрезков (мм);  $N$  – общее число зерен, пересеченных отрезками прямых линий.

Для исследований изменения микроструктуры сплава в процессе деформации использовался сканирующий электронный микроскоп Quanta200 3D. Для этого поверхность образцов после растяжения полировали, удаляя тонкий слой  $\sim 30$  мкм. Исследование структуры осуществлялось при ускоряющем напряжении 30 кВ и шагом сканирования 0,1 мкм. Площадь сканирования составляла  $50 \times 50$  мкм<sup>2</sup>.

#### 2.2.4 Рентгеноструктурный анализ

Фазовый состав и объемную долю  $\alpha$  и  $\beta$  фазы определяли методом рентгеноструктурного анализа с использованием дифрактометра Shimadzu XRD-7000 в излучении  $\text{Cu}_\alpha$ . Расчет плотности дефектов в сплаве проводили по уширению дифракционных максимумов ( $\gamma$ ) на их полувысоте с применением аппроксимации Коши и с использованием программного обеспечения дифрактометра PowderCell 2.4. В величину  $\gamma$  вносят вклад две составляющие: области когерентного рассеяния (ОКР) и микронапряжения решетки. Для разделения вкладов в уширение указанных факторов обычно используют максимумы одной плоскости двух порядков. Для ГПУ решетки получение второго максимума проблематично. Поэтому для разделения вкладов использовали максимумы плоскостей (101) и (103). В приближении Коши уширение дифракционных максимумов определяется формулой:

$$\gamma = \gamma_D + \gamma_\epsilon = \frac{\lambda}{D \cos \theta} + 4\epsilon \tan \theta, \quad (3)$$



где  $\gamma_D$  и  $\gamma_\varepsilon$  - вклады в уширение дифракционного максимума соответственно ОКР и микронапряжения решетки;  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения;  $\theta$  – угол дифракции плоскости (hkl);  $D$  – размер областей когерентного рассеяния;  $\varepsilon$  – микродеформация решетки.

Плотность дислокаций ( $\rho$ ) в  $\alpha$  и  $\beta$  фазе рассчитывается по формулам (4) и (5) соответственно:

$$\rho = \sqrt{\pi} \frac{\gamma^2}{b^2}, \quad (4)$$

$$\rho = \frac{\gamma^2}{9b^2}, \quad (5)$$

где  $b$  - вектор Бюргерса (для  $\alpha$ -фазы титана  $b = 2,95 \cdot 10^{-10}$  м, для  $\beta$ -фазы титана  $b = 2,86 \cdot 10^{-10}$  м).

Внутреннее напряжение ( $F$ ) в сплаве рассчитывали по формуле:

$$F = \frac{E\varepsilon}{\mu} \quad (6)$$

где  $E$  -модуль Юнга (для титановых сплавов равен 110 ГПа),  $\mu$  – коэффициент Пуассона (для титановых сплавов равен 0,32).

### 2.2.5 Микротвердость

Измерение микротвердости ( $H_\mu$ ) проводили на микротвердомере ПМТ-3 с помощью алмазной пирамиды Виккерса с нагрузкой 0,1 кг. Время нагружения составляло 15 секунд. Расчет величины  $H_\mu$  проводили по формуле:

$$H_\mu = \frac{1,854 \cdot P}{(0,31 \cdot 10^{-6}) \cdot d^2} \quad (7)$$

где  $H_\mu$  – число твердости в ГПа,  $P$  – нагрузка в н,  $d$  – диагональ отпечатка.

### 2.2.6 Механические испытания

Механические испытания на одноосное растяжение проводили на установке ПВ-3012М (рисунок 26) с автоматической записью кривой растяжения в координатах “нагрузка-время”. Начальная скорость растяжения составляла  $6,9 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

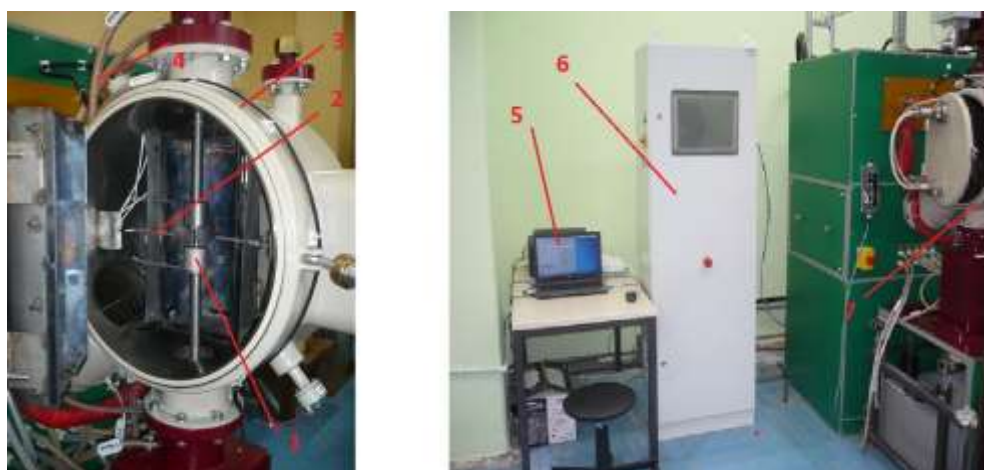


Рисунок 26 – Общий вид разрывной вакуумной машины ПВ-3012М

1 – молибденовые захваты для образца; 2 – термопары; 3 – рабочая камера;  
4 – система охлаждения; 5 – компьютер; 6 – система управления установкой;  
7 – вакуумная система

Испытания проводили в вакууме  $10^{-2}$  Па, для достижения которого использовали форвакуумный и диффузионные насосы. Схематичное изображение установки ПВ-3012М и вакуумной системы представлено на рисунке 27.

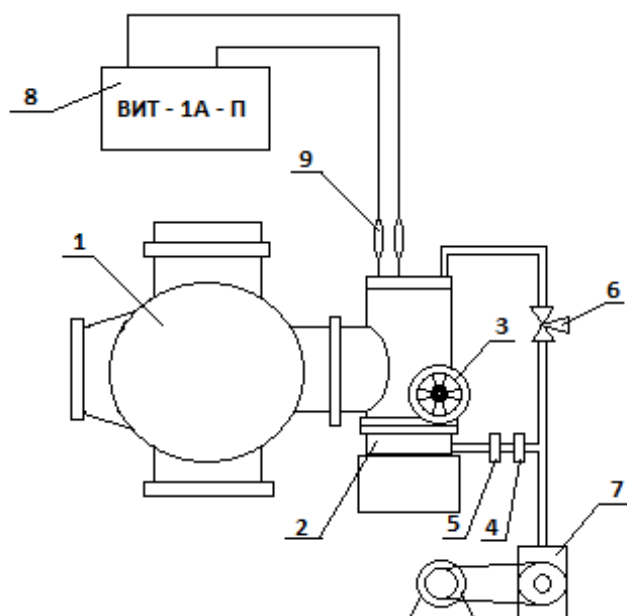


Рисунок 27 – Схематичное изображение вакуумной разрывной машины  
ПВ-3012М

1 – вакуумная камера; 2 – насос паромасляный Н-5С; 3 – затвор вакуумный;  
4 – вентиль электромагнитный ВЭ-25; 5 – вентиль ДУ25; 6 – вентиль ДУ25;  
7 – насос форвакуумный ВН-2МГ; 8 – вакуумметр ВИТ-1А-П; 9 – лампы  
манометрические

Типичная кривая растяжения, полученная после механических испытаний, представлена на рисунке 28.

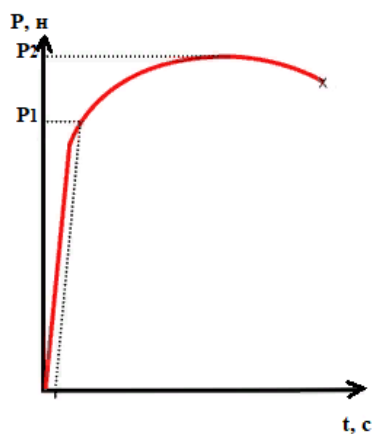


Рисунок 28 – Типичная кривая растяжения в координатах нагрузка-время

Для расчета прочностных характеристик сплава: предела текучести ( $\sigma_{02}$ ) и предела прочности ( $\sigma_B$ ) использовали формулы:

$$\sigma_{02} = \frac{P_1}{S}, \quad (8)$$

$$\sigma_B = \frac{P_2}{S}, \quad (9)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  – нагрузка,  $S$  – площадь поперечного сечения образца.

Предельную деформацию до разрушения ( $\delta$ ) определяли по формуле:

$$\delta = \frac{\Delta l}{l}, \quad (10)$$

где  $\Delta l$  – абсолютное удлинение образца,  $l$  – первоначальная длина образца.

## **Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Цель данного раздела магистерской диссертации заключается в экономическом планировании и оценке ресурсоэффективности метода, сочетающего предварительное наводораживание и горячее всестороннее прессование со сменой оси деформации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1 проанализировать конкурентные технические решения проекта;
- 2 провести SWOT-анализ для выявления сильных и слабых сторон проекта;
- 3 выполнить планирование научно-исследовательской работы;
- 4 создать график Ганта;
- 5 провести расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- 6 определить ресурсную, финансовую, бюджетную эффективность исследования.

На данный момент этот раздел считается один из значимых в современном проектировании, т.к. оборудование рассматривается не только исходя из их рабочих характеристик, но и по экономической оценки, выбирается наиболее выгодный вариант.

### **4.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Для того чтобы определить потенциальных потребителей результатов исследования необходимо провести сегментирование рынка и тщательно проанализировать его целевой сегмент.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором планируется продаваться в будущем разработка / товар. Сегмент рынка – это группы потенциальных

потребителей, лиц или организаций, обладающих набором общих признаков, которые заинтересованы в разработке.

К потенциальным потребителям результатов исследования можно отнести как потребителей российского, так и международного рынков. На российском рынке потенциальным потребителем изготавливаемой продукции могут выступать университеты, научные центры и производства (например, ВСМПО-АВИСМА, ИФПМ СО РАН). Также это могут быть международные лаборатории, занимающиеся проблемами водородного охрупчивания материалов.

#### **4.2 Анализ конкурентных технических решений**

С целью успешного вывода научной разработки на рынок, необходимо постоянно и систематически проводить анализ аналогичных товаров конкурирующих групп, т.к. новые разработки постоянно появляются и изменяются с течением времени. Анализ группы конкурирующих товаров необходимо проводить с целью внесения, в научное исследование, важных корректировок и исправлений, целью которых является постоянное повышение конкурентоспособности товара (разработки) на рынке.

В данной работе проводились механические испытания УМЗ титанового сплава ВТ16, полученного методом, сочетающим предварительное легирование водородом и горячее всестороннее прессование со сменой оси деформации. Данная методика является модифицированной стандартной методики ИПД и позволяет в несколько раз снизить энергетические затраты для прессования титановых сплавов. Главной проблемой данного метода прессования является водород – вредная примесь для любых материалов. Оценочная карта технических решений приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к</sub>
1. Быстрота обработки полученных результатов	0,5	5	5	2,5	2,5
2. Достоверность получаемых результатов	0,3	5	2	1,5	0,6
3. Исследование прочностных и пластических характеристик	0,1	5	5	0,5	0,5
4. Возможность подключения к ЭВМ	0,05	5	4	0,25	0,2
5. Безопасность	0,03	3	2	0,09	0,06
6. Надежность	0,02	5	2	0,1	0,04
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>28</b>	<b>20</b>	<b>4,94</b>	<b>3,9</b>

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (11)$$

где  $B_i$  – вес показателя (в долях единицы);  $B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Позиция разработки и конкурентов оценивается по пятибалльной шкале. Веса показателей в сумме должны составлять 1.

Таким образом, по итогам анализа, представленным в карте сравнения оценок конкурентных разработок (технических решений), можно сделать вывод, что получение УМЗ структуры в сплаве ВТ16 по вышеуказанному способу по многим критериям обладает высокими показателями, по сравнению

с другими методами получения УМЗ структуры. А именно таким как достоверность получаемых результатов, возможность подключения к ЭВМ, безопасность, надежность.

### 4.3 SWOT-анализ

Для исследования внешней и внутренней среды выполняемого научного исследования был проведён SWOT-анализ. Целью данного анализа является описание сильных и слабых сторон проекта, выявление возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде (таблица 4).

Таблица 4 – SWOT-анализ

	<b>Сильные стороны научно-исследовательской разработки:</b>	<b>Слабые стороны научно-исследовательской разработки:</b>
	С1. Актуальность тематики С2. Наличие необходимого оборудования для проведения эксперимента С3. Получение УМЗ структуры в труднодеформируемом сплаве ВТ16 С4. Решение фундаментальных задач исследования.	Сл1. Длительность проведения анализа Сл2. Предварительная подготовка экспериментальных образцов перед анализом Сл3. Дорогостоящее обслуживание Сл4. Длительный срок поставок материалов для проведения научного исследования.
<b>Возможности:</b> В1. Потенциальное использование в других отраслях В2. Исследование взаимодействия водорода со сплавом.	Получение УМЗ структуры методом с дополнительным легированием водорода, позволяет сформировать в сплаве ВТ16 однородную зеренно-субзеренную структуру	Водород являясь вредной примесью с одной стороны охрупчивает сплав, ухудшая его прочностные характеристики, а с другой повышает за счет твердорастворного упрочнения
<b>Угрозы:</b> У1. Недостаток финансового обеспечения научного исследования со стороны государства У2. Титановые сплавы редкие материалы, и стоимость исследований может увеличиваться У3. Проведение подобных экспериментов в других учебных заведениях.	Полученные результаты откроют новые возможности в использовании титановых сплавов марки ВТ16 в промышленности, медицине и судостроении	Привлечение посторонних инвесторов, в качестве грантов, для развития проекта



Таким образом, при помощи SWOT-анализа были выявлены сильные и слабые стороны научно-исследовательского проекта, а также его возможности и вероятные угрозы. Благодаря развитию проекта с разработкой метода, сочетающего предварительное наводораживание и горячее всестороннее прессование со сменой оси деформации, получения УМЗ структуры в титановом сплаве BT16 можно получать однородную УМЗ зеренно-субзеренную структуру с наименьшими энергетическими затратами по сравнению с другими методами ИПД, что несомненно увеличит область применения полученного материала. Несмотря на все сильные стороны проекта всегда есть возможность, что появится более совершенный метод прессования или усовершенствуют уже имеющиеся методики до конкурирующего уровня.

#### **4.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации**

На любой стадии цикла жизни научной разработки необходимо проводить оценку степени готовности данной разработки к коммерциализации. В ходе проведения анализа по таблице 5, приведенной ниже, по каждому показателю ставится оценка по пятибалльной шкале. При этом система измерения по каждому направлению (степень проработанности научного проекта, уровень имеющихся знаний у разработчика) отличается. Так, при оценке степени проработанности научного проекта 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта.

Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 означает не знаком или мало знаю, 2 – в объеме теоретических знаний, 3 – знаю теорию и практические примеры применения, 4 – знаю теорию и самостоятельно выполняю, 5 – знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

Таблица 5 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	5	5
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	5	5
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	4
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	1	1
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	4
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	1	1
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	1	1
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	1	1
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	1	1
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	5	5
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	2	2
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	1
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	4	4
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	3	3
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	2	2
	<b>Итого:</b>	40	40

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i, \quad (12)$$

где  $B_{\text{сум}}$  – суммарное количество баллов по каждому направлению;  $B_i$  – балл по  $i$ -му показателю.

Полученное значение  $B_{\text{сум}}$  в таблице 5 позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. Так, если значение  $B_{\text{сум}}$  получилось от 75 до 60, то такая разработка считается перспективной, а знания разработчика достаточными для успешной ее коммерциализации, от 59 до 45 – то перспективность выше среднего, от 44 до 30 – то перспективность средняя, от 29 до 15 – то перспективность ниже среднего, от 14 и ниже – то перспективность крайне низкая.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что перспективность коммерциализации разработки находится на среднем уровне. Уровень можно повысить путем детального исследования коммерческой составляющей проекта.

#### **4.5 Инициирование проекта**

Группа процессов инициирования состоит из действий, совершаемых для создания новой научно-технической разработки, или перехода в новую фазу уже существующей. В рамках процесса инициирования формулируются начальные цели и содержание предстоящего проекта. Так же определяются первоначальные финансовые ресурсы. Определяются, заинтересованные в проекте стороны, внешние и внутренние, которые будут влиять на итоговый результат научной разработки. В Уставе проекта записывается вся эта информация.

Устав проекта документально закрепляет потребности нового проекта, текущую формулировку потребностей заказчика научно-технической разработки, а также результат (новую услугу или продукт), который в итоге планируется создать.

Результаты данного исследования могут быть интересны не только выпускающему отделению, но и предприятиям, на базе которых имеются исследовательские лаборатории и институтам, занимающимся исследованиями взаимодействия водорода с металлами. В таблице 6 представлен список заинтересованных сторон проекта и их ожидания от результата.

Таблица 6 – Стороны, заинтересованные в проекте

<b>Стороны, заинтересованные в проекте</b>	<b>Ожидания заинтересованных сторон</b>
Отделение ЭФ ИЯТШ ТПУ	Разработка новой методики прессования труднодеформируемых материалов
Исследовательские лаборатории и институты	Предложение по внедрению методики получения структуры по вышеуказанному методу в работу лаборатории

Целью проекта является результат работы, полученный при выполнении ряда задач. В таблице 7 приведена информация о целях поставленного проекта и ожидаемых результатах.

Таблица 7 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Установление влияния предварительного наводораживания на микроструктуру и механические свойства УМЗ титанового сплава BT16
Ожидаемые результаты проекта:	Отображены основные изменения в микроструктуре и свойствах в УМЗ титановом сплаве BT16

Продолжение таблицы 7

Критерии приемки результатов проекта:	Критерии:
	1. Оценка микроструктуры с использованием различных методов прессования
	2. Карта основных характеристик
Требования к результату проекта:	Требования:
	1. Минимальная погрешность при расчетах
	2. Аттестация полученных критериев

В таблице 8 приведена информация о рабочей группе проекта, описана роль и функции, выполняемые участниками проекта.

Таблица 8 – Рабочая группа проекта

<b>№ п/п</b>	<b>ФИО, основное место работы, должность</b>	<b>Роль в проекте</b>	<b>Функции</b>
1	Хованова Анастасия Олеговна, отделение Экспериментальной физики ИЯТШ НИ ТПУ, магистрант	Исполнитель проекта	Выполнение всех поставленных задач. Реализация поставленных целей. Подготовка конечного продукта в виде отчета по НИР
2	Степанова Екатерина Николаевна, отделение экспериментальной физики ИЯТШ НИ ТПУ, старший преподаватель	Руководитель проекта	Постановка цели и задачей для выполнения проекта.

Далее были определены ограничения и допущения по данному проекту, которые представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Ограничения и допущения проекта

<b>Фактор</b>	<b>Ограничения/ допущения</b>
Источник финансирования	НИ ТПУ
Сроки проекта:	09.01.2021 – 31.05.2021
Дата утверждения плана управления проектом	09.01.2021
Дата завершения проекта	31.05.2021

В результате анализа была определена рабочая группа проекта. Также были описаны цели и результаты, предъявляемые к проекту и круг заинтересованных сторон, были описаны ограничения и допущения проекта.

#### **4.6 Планирование научно-исследовательских работ**

Определяющим фактором выражения основной части стоимости научно-технической разработки являются заработные платы лиц, задействованных в реализации проекта. В связи с этим, наиболее важным моментом является максимально точное определение трудозатрат каждого из участников проекта.

Планирование и организация научно-исследовательских работ осуществляется в порядке:

- 1 определение структуры работ в рамках научного исследования;
- 2 определение участников каждой работы;
- 3 установление продолжительности работ;
- 4 построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения работы формируется рабочая группа, в состав которой входит научный руководитель проекта (НР) и инженер (И). Перечень этапов, работ и распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 10.

Таблица 10 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

<b>Основные этапы</b>	<b>№ раб</b>	<b>Содержание работ</b>	<b>Должность исполнителя</b>
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение задания	И, НР
	2	Календарное планирование работ по теме	И
	3	Изучение материалов по теме	И
Выбор направления исследований	4	Анализ методов ИПД	И
	5	Выбор метода выполнения работы	И, НР
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Применение метода к другим титановым сплавам	И
	7	Анализ результатов работы	И
Изготовление образцов для исследований	8	Механическое и электролитическое полирование)	И, НР
Обобщение и оценка результатов	9	Анализ полученных данных о структуре и свойствах сплава	И

Таким образом, из таблицы 8 видно, что основная задача инженера состояла в проведении экспериментов и подготовке отчетной документации, научный руководитель же занимался начальной постановкой задач и целей исследования.

#### 4.7 Продолжительность этапов работ

Для определения трудоёмкости реализации научного исследования выпускной квалификационной работы используется экспертный способ, основным показателем которого является человек-день. Для расчета предполагаемого значения трудоёмкости используют следующую формулу:

$$t_{ож} = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5}, \quad (13)$$

где  $t_{ож}$  - ожидаемая трудоёмкость выполнения работы чел.-дн.;  
 $t_{min}$  - минимально возможная трудоёмкость выполнения работы чел.-дн.;  
 $t_{max}$  - максимально возможная трудоёмкость выполнения работы, чел.-дн.

Произведем оценку трудоёмкости выполнения научного исследования для научного руководителя:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 5}{5} = 3,2 \text{ чел. - дн.}, \quad (14)$$

Произведем оценку трудоёмкости выполнения научного исследования для инженера:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 90 + 2 \cdot 180}{5} = 126 \text{ чел. - дн.}, \quad (15)$$

Рассчитав ожидаемую трудоёмкость работ, определим продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_{РД}$ , учитывая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями, по следующему соотношения:

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} * K_{Д}, \quad (16)$$



где  $T_{РД}$  - продолжительность одного этапа работы, раб.дн.;  
 $t_{ож}$  - продолжительность работы, дн.;  $K_{ВН}$  - коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, в частности, возможно  $K_{ВН} = 1$ ;  
 $K_{Д}$  - коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ,  $K_{Д} = 1$ .

Произведем расчет продолжительности работы выполнения научного исследования для научного руководителя:

$$T_{РД} = \frac{3,2}{1} = 3,2 \text{ раб.дн.}, \quad (17)$$

Произведем расчет продолжительности работы выполнения научного исследования для инженера:

$$T_{РД} = \frac{126}{1} = 126 \text{ раб.дн.}, \quad (18)$$

Для проведения научного исследования, представленного в магистерской диссертации, выбирают специальную узко направленную научную тему. Для этого строится специальный ленточный график проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Для построения графика необходимо перевести рабочие дни в календарные дни, для чего воспользуемся следующим соотношением:

$$T_{КД} = T_{РД} * T_{К}, \quad (19)$$

где  $T_{КД}$  - продолжительность выполнения этапа в календарных днях;  
 $T_{К}$  - коэффициент календарности.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$T_K = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}}, \quad (20)$$

где  $T_{КАЛ}$  - количество календарных дней в году;  $T_{ВД}$  - количество выходных дней в году;  $T_{ПД}$  - количество праздничных дней в году.

Рассчитаем коэффициент календарности:

$$T_K = \frac{365}{365 - 52 - 10} = 1,205, \quad (21)$$

Далее необходимо построить таблицу по результатам расчетов, в которой необходимо указать трудоемкость работы, название работы, а также указать длительность работ в рабочих и календарных днях. Временные показатели проведения научного исследования приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ						Длитель. работ в рабочих днях $T_{РД}$		Длитель. работ в календар. днях $T_{КД}$	
	$t_{min}$ , чел-дни		$t_{max}$ , чел-дни		$t_{ож}$ , чел-дни					
Исполнители	НР	И	НР	И	НР	И	НР	И	НР	И
Разработка технического задания	2		5		3,2		3,2		3,9	
Выбор направления исследований	2	4	4	8	2,8	5,6	2,8	5,6	3,4	6,8
Теоретические и экспериментальные исследования	5	30	10	35	7	32	7	32	8,4	38,6
Обобщение и оценка результатов	1	5	2	10	1,4	7	1,4	7	1,7	8,4



Продолжение таблицы 11

Разработка технической документации	6	20	12	25	8,4	22	8,4	22	10,1	26,5
Изготовление опытного образца	4	10	8	15	5,6	12	5,6	12	6,8	14,5
Оформление отчета по НИР		25		30		27		27		32,5
Итого:					28,4	105,6	28,4	105,6	34,3	127,3

На основании таблицы 11 был построен календарный план-график проведения работ.

Таблица 12 – Календарный план-график проведения работ

Код работ	Вид работ	Исполнители	$T_{ki}$	Продолжительность выполнения работ														
				январь			февраль			март			апрель			май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление и утверждение задания магистерской диссертации	НР, И	2															
2	Календарное планирование работ по теме	НР, И	4															
3	Изучение материалов по теме	И	16															
4	Анализ исходных данных	НР, И	3															
5	Выбор метода выполнения работы	НР, И	3															
6	Применение метода к исходным данным	И	28															
7	Анализ результатов работы	И	30															
8	Составление отчета по работе	И	11															

 – инженер,  – научный руководитель.

#### 4.8 Бюджет научно-исследовательских работ

В состав затрат на создание проекта включается величина всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости ее выполнения производится по следующим статьям затрат:

- 1 материалы затраты научно-исследовательской работы;
- 2 затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;
- 3 основная заработная плата исполнителей темы;
- 4 дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- 5 отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- 6 накладные расходы научно-исследовательской работы.

Таблица 13 – Материальные затраты научно-исследовательских работ

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З <sub>м</sub> ), руб.
Титановый сплав ВТ16	шт.	20	780	15600
Бумага, формат А4	пачка	1	300	300
Интернет	М/бит	1	350	350
Спирт	мл	100	70	15
Резиновые перчатки	шт.	5	20	100
<b>Итого:</b>				16365

Для вычисления основной заработной платы необходимо учесть научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, участвующих в выполнении выпускной квалификационной работе

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) руководителя (инженера) от предприятия рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (22)$$

где  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн;  $Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (23)$$

где  $Z_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника (руб.);  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года (10,4);  $F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала (раб. дн.).

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}}) \cdot k_{\text{р}}, \quad (24)$$

$Z_{\text{тс}}$  – заработная плата по тарифной ставке (руб.);  $k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент (равен 0,3);  $k_{\text{р}}$  – районный коэффициент (для г. Томска равен 1,3).

Таблица 14 – Баланс рабочего времени

<b>Показатели рабочего времени</b>	<b>Руководитель</b>	<b>Инженер</b>
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	118	118
Отпуск	48	48
Действительный годовой фонд рабочего времени	247	247

Приведем расчет заработной платы для научного руководителя:

$$З_{\text{м}} = 35120 \cdot (1 + 0,3) \cdot 1,3 = 59352,8 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{дн}} = \frac{59352,8 \cdot 10,4}{247} = 2499,1 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{осн}} = 2499,1 \cdot 12 = 32487,8 \text{ руб.}$$

Приведем расчет заработной платы для инженера:

$$З_{\text{м}} = 16140 \cdot (1 + 0,3) \cdot 1,3 = 27276,6 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{дн}} = \frac{27276,6 \cdot 10,4}{247} = 1148,5 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{осн}} = 1148,5 \cdot 97 = 111404,5 \text{ руб.}$$

Таблица 15 – Расчёт основной заработной платы

<b>Исполнители</b>	<b>Оклад, руб.</b>	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{р}}$	<b>З<sub>м</sub>, руб</b>	<b>З<sub>дн</sub>, руб.</b>	<b>Т<sub>р</sub>, раб. дн.</b>	<b>З<sub>осн</sub>, руб.</b>
НР	35120	0,3	1,3	59352,8	2499,1	12	32487,8
И	16140	0,3	1,3	2727,6	1148,5	97	111404,5
<b>Итого:</b>							<b>143892,3</b>

Таким образом, расчет основной заработной платы производился с учетом премиального и районного коэффициентов, и основная заработная плата составила 143892,3 рублей.

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10–15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы. Таким образом, сумма основной заработной платы участников проекта и дополнительной будет составлять статью затрат расходов на зарплату:

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп}, \quad (25)$$

где  $З_{осн}$  – основная заработная плата, руб.,  $З_{доп}$  – дополнительная заработная плата рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{доп} = k_{доп} \cdot З_{осн}, \quad (26)$$

где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,15). Расчет дополнительной заработной платы приведен в таблице 16.

Таблица 16 – Дополнительная заработная плата исполнителей исследования

Исполнитель	Научный руководитель	Инженер
Основная зарплата, руб.	32487,8	111404,5
Дополнительная зарплата, руб.	4873,17	16710,67
Суммарная зарплата, руб.	37360,97	128115,17
<b>Итого, руб.</b>	<b>165476,14</b>	

Таким образом, расчет дополнительной заработной платы производился с дополнительным коэффициентом 15% и итоговая суммарная заработная плата составила 165476,14 рублей.

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляет 30,2% от полной заработной платы по проекту:

$$C_{\text{внеб}} = 0,302 \cdot 165476,14 = 49973,79 \text{ руб.}, \quad (27)$$

$k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Таким образом, затраты на социальный налог составляют 49973,79 рублей.

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Накладные расходы составляют 80-100 % от суммы основной и дополнительной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении проекта. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = k_{\text{нр}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (28)$$
$$Z_{\text{накл}} = (165476,14) \cdot 0,8 = 132373,7 \text{ руб.}$$

где  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 80%.

Таким образом, сумма накладных расходов составила 132373,7 рублей, данная сумма включается в себя оплату за публикацию статьи в журнале первого квартиля.



Для выполнения магистерской диссертации использовалась вакуумная установка ПВ-3012М. Средства на приобретение мельницы не затрачивались, так как она уже был приобретена университетом. Необходимо рассчитать амортизационные отчисления на данный вид оборудования.

Срок полезного использования установка составляет 10 лет, поэтому норма амортизации равна:

$$H_a = \frac{1}{n} * 100 = \frac{1}{10} * 100 = 10\% \quad (29)$$

где  $H_a$  – норма амортизации в процентах,  $n$  – срок полезного использования в годах.

Первоначальная стоимость оборудования составляет 300000 рублей. Из этого следует, что годовая сумма амортизации составит:

$$A_{\Gamma} = \frac{F_{\Pi} * H_a}{100} = \frac{300000 * 10}{100} = 30000(\text{руб.}) \quad (30)$$

где  $F_{\Pi}$  – первоначальная стоимость.

В таком случае сумма ежедневных амортизационных расходов составит:

$$A_M = \frac{A_{\Gamma}}{365} = \frac{148500}{365} = 82,2(\text{руб.}) \quad (31)$$

Срок работы над проектом с использованием данной установки составляет 21 день. За время работы сумма амортизации составляет:

$$A = A_M * 21 = 1726(\text{руб.}) \quad (32)$$

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в

качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Расчет бюджета научно-исследовательской работы приведен в таблице 17.

Таблица 17 – Расчет бюджета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условные обозначения	Сумма, руб
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	16365
Основная заработная плата	$C_{\text{зп}}$	143892,3
Дополнительная заработная плата	$C_{\text{доп}}$	21583,84
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	49973,79
Накладные расходы	$C_{\text{нк}}$	132373,7
Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам}}$	1726
Итого:	$C$	365914,63
НДС	$\text{НДС} = C \cdot 20\%$	73182,9
Цена разработки НИР		439097,5

Таким образом, проведено планирование бюджета научного исследования, рассчитаны материальные затраты, основная заработная плата научного руководителя и инженера, отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления). Бюджет затрат составил 439097,5 рублей.

#### 4.9 Определение сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его

нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{финр}}^{исп.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (33)$$

где  $\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;  $\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (34)$$

где  $a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;  $b_i$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки.

Таблица 18 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

<b>ПО</b> <b>Критерии</b>	<b>Весовой коэффициент параметра</b>	<b>Текущий проект</b>	<b>Аналог</b>
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,25	5	3
2. Соответствует требованиям потребителей	0,15	4	4
3. Энергосбережение	0,20	4	4

Продолжение таблицы 18

4. Надежность	0,20	4	4
5. Материалоемкость	0,20	5	3
Интегральный показатель ресурсоэффективности		5,25	4,35

$$I_{\text{тп}} = 5 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,2 = 5,25$$

$$I_{\text{аналог}} = 3 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,2 = 4,35$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки  $I_{\text{исп.}i}$  определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп.}i} = \frac{I_{p-\text{исп.}i}}{I_{\text{финр.}i}} \quad (35)$$

Сравнительная эффективность проекта определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп.}1}}{I_{\text{исп.}2}} \quad (36)$$

Таблица 19 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Разработка	Аналог
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	5,25	4,35
3	Интегральный показатель эффективности	5,25	4,35
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,15	0,97

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разрабатываемый проект является более эффективным вариантом решения поставленной задачи по сравнению с предложенным аналогом, основываясь на показателях эффективности. Традиционная оценка экономической эффективности полученных результатов невозможна, т.к. они носят чисто научный характер.

## **Выводы к главе 4**

В данной главе был проведен расчет затрат на выполнение научно-исследовательской работы и сделаны основные выводы:

1. Определены потенциальные потребители результатов исследования – результаты данной работы будут наиболее привлекательны преимущественно для научно-исследовательских институтов, но также государственные промышленные комплексы и заводы.

2. В результате проведения анализа конкурентных технических решений сделан вывод о том, что выбранный метод прессования является наиболее предпочтительным для получения УМЗ структуры в сплаве ВТ16 по сравнению с другими методами ИПД.

3. Выявлены сильные и слабые стороны научно-исследовательского проекта, а также его возможности и вероятные угрозы при помощи SWOT-анализа. Из анализа было установлено, что сильные стороны, такие как актуальность тематики, наличие необходимого оборудования, формирование УМЗ структуры методом с дополнительным легированием в труднодеформируемом сплаве ВТ16 и решение фундаментальных задач исследования преобладают над слабыми, поэтому разработка проекта является перспективным научным исследованием с такими возможностями, как использование модели не только в медицине, но и в других отраслях, а также ее развитие на основе ряда перспективных материалов.

4. В процессе планирования научно-исследовательского проекта построен календарный план, определены виды работ, установлены даты начала и окончания работ и состав участников.

5. При планировании бюджета рассчитаны материальные затраты, основная заработная плата руководителя и инженера, отчисления во внебюджетные фонды. Бюджет затрат составил 439097,5 рублей. Он состоит из материальных затрат (16365 руб.), затрат на оплаты труда (143892,3руб.),

отчислений во внебюджетные фонды (49973,79 руб.) и накладных расходов (132373,7 руб.).

6. Разрабатываемый проект является более эффективным вариантом решения поставленной задачи по сравнению с предложенным аналогом, основываясь на показателях эффективности.

7. Полученные в ходе исследования результаты, могут быть использованы для дальнейших исследований систем металл-водород, а также имеют практическую ценность и в полной мере способствует решению многих фундаментальных задач.

## **Глава 5. Социальная ответственность**

### **Введение**

При выполнении настоящей магистерской диссертации были использованы: вакуумная установка ПВ-3012М с автоматической записью кривой растяжения и персональная электронно-вычислительная машина (ПЭВМ). При помощи вакуумной установки ПВ-3012М производилось механическое испытание на растяжение титанового сплава ВТ16, предварительно легированного водородом, в интервале температур (293 – 973) К в кабинете № 102 корпуса № 2 ИФПМ СО РАН. Данные титановые сплавы ВТ16 в основном используются в качестве крепежных деталей в судостроении и для лопастей самолетов. ПВ-3012М управляется специальным блоком с сенсорным экраном. Питается установка от сети переменного тока напряжением 380 В.

Таким образом, требуется провести анализ вредных и опасных производственных факторов при осуществлении работ на данных вакуумных установках, а также определить комплекс защитных мероприятий.

### **5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

#### **5.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства**

К работе на вакуумной установке ПВ-3012М с автоматической записью кривой растяжения в координатах нагрузка-время допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющих медицинских противопоказаний, прошедших вводный инструктаж и инструктаж по безопасности труда на рабочем месте [78]. К самостоятельной работе допускаются работники после специального обучения и проверки знаний правил электробезопасности, приобретенных навыков и



безопасных способов выполнения работы на установке ПВ-3012М ознакомленные с инструкцией по эксплуатации прибора имеющие не менее II группы по электробезопасности [79].

Повторная проверка знаний норм и правил электробезопасности, проводится с работниками не реже 1 раза в 12 месяцев, повторный инструктаж на рабочем месте – не реже 1 раза в 3 месяца [80].

По данной теме рассматриваются специальные законодательные и нормативные документы:

- инструкция № 2-14 по охране труда при работе с электрооборудованием напряжением до 1000 В;
- инструкция № 2-08 по охране труда при работе с ПЭВМ и ВДТ.

### **5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя**

Основными элементами рабочего места оператора являются: рабочий стол, рабочий стул, дисплей, клавиатура. Рабочий стул должен быть подъемно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья. Требования к каждому из этих элементов рабочего места рассмотрено подробно в ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования [81].

Согласно ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде [82] рабочее место с дисплеем должно обеспечивать оператору возможность удобного выполнения работ в положении сидя и не создавать перегрузки костно-мышечной системы. Дисплей на рабочем месте оператора должен располагаться так, чтобы изображение в любой его части было различимо без необходимости поднять или опустить голову. Угол наблюдения экрана

оператором относительно горизонтальной линии взгляда не должен превышать 60° [92].

Помещение, в котором располагается установка, имеет линейные размеры 6×5 м и высоту 3 м. В помещении есть два окна размерами 1,8×1,5 м, которые обеспечивают достаточное проникновение солнечного света, с противоположной стороны окон находится дверной проем.

## 5.2 Профессиональная социальная безопасность

Для идентификации потенциальных факторов был использован ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [83]. Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды представлены в таблице 20.

Таблица 20 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1 Отклонение показателей микроклимата	-	-	+	СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
2 Превышение уровня шума и вибраций	-	+	+	ГОСТ 12.1.003-80. Шум. Общие требования безопасности. ГОСТ 12.1.029-80. Средства и методы защиты от шума СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях

Продолжение таблицы 19

				жилых, общественных зданий и на территории застройки СН 2.2.4/2.1.8.566–96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. СанПиН 2.2.4.3359-16 Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах
3 Статические физические нагрузки	-	-	-	ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования ГОСТ 21889-76 Система «Человек-машина». Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования
4 Недостаточная освещенность рабочей зоны	-	-	+	СНиП 23-05-95* Естественное и искусственное освещение
5.Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	-	+	+	ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности.

## **5.2.1 Анализ вредных факторов производственной среды**

### **5.2.1.1 Повышенный уровень шума**

Основными источниками шума в лабораторной установке являются пластинчато-роторный и диффузионный масляный насосы для создания вакуума, а также работа вытяжной вентиляции. Шум оказывает на организм человека неблагоприятное воздействие и может вызвать различного рода болезненные состояния, в том числе тугоухость и глухоту. Длительное воздействие шума оказывает вредное влияние на ЦНС и психику человека. Шум снижает работоспособность и производительность труда, препятствует нормальному отдыху и нарушает сон.

Согласно СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки [85], согласно виду трудовой деятельности – Высококвалифицированная работа, требующая сосредоточенности, административно-управленческая деятельность, измерительные и аналитические работы в лаборатории уровни звука и эквивалентный уровни звука (дБА) не должны превышать 60 дБА, следовательно, данный вид трудовой деятельности относится к напряженному труду 1 степени, легкая физическая нагрузка [85].

При работе механического насоса максимальность шумового загрязнения составляет 52 дБ. Длительность возникновения максимальных шумов составляет не более 5 минут. Рабочее место расположено в 2-2,5 метрах от установки.

Методы противозумовой защиты делятся на методы коллективной защиты и средства индивидуальной защиты и более подробно описаны в ГОСТ 12.1.029-80. Средства и методы защиты от шума [86]. Таким образом, в лаборатории применяются: специальные наушники и беруши, а также звукоизоляции.

### 5.2.1.2 Повышенный уровень вибрации

К источникам вибрации в лаборатории относятся пластинчато-роторный и диффузионный масляный насосы для создания вакуума. Воздействие вибрации на человека вызывает нарушения физиологического и функционального состояния организма человека. Как следствие, это приводит к понижению производительности и возникновению вибрационной болезни.

Согласно СН 2.2.4/2.1.8.566–96 [87], установка производит общую вибрацию 3 категории типа В. К данной категории относятся технологические вибрации, воздействующие на человека на рабочих местах стационарных машин или передающиеся на рабочие места, не имеющие источников вибрации.

Согласно СанПиН 2.2.4.3359-16 Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах [88] максимально допустимые нормативные эквивалентные скорректированные значения и уровни виброускорения для локальной вибрации составляют  $2,0 \text{ м/с}^2$  и 124 дБ. Работа в условиях воздействия локальной вибрации с текущими среднеквадратичными уровнями, превышающими настоящие санитарные нормы более чем на 12 дБ (в 4 раза) по интегральной оценке, не допускается [88].

К организационным мероприятиям относится ограничение времени воздействия вибрации на человека из-за особенностей установки, используемые нагнетающие устройства работают только в период проведения эксперимента. В лаборатории присутствует средство индивидуальной защиты от вибрации – виброзащитная подставка. Согласно ГОСТ 12.4.002-97 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты рук от вибрации. Технические требования и методы испытаний [89] – защитой рук от вибрации являются – полуперчатки, перчатки.

### 5.2.1.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Правильно организованное освещение повышает работоспособность и эффективность труда, снижает травматизм, сохраняет низкий уровень утомления и повышает безопасность рабочего места. Слабое освещение приводит к преждевременному утомлению, ослаблению внимания и перенапряжению зрительных органов. Повышенный уровень освещения ведет к рези в глазах и слепоте. Дезориентацию вызывает неправильное направление света на рабочем месте.

Согласно СНиП 23-05-95\* Естественное и искусственное освещение характеристика зрительной работы – высокой точности, разряд зрительной работы III г [90]. Для данной характеристики зрительной работы необходимая освещенность – 200 лк.

Таким образом, была выбрана лампа ЛД, для которой световой поток и мощность составляют 4250 Лм и 80 Вт, соответственно. Тип ламп был выбран ОД размерами 1531×266 мм. Данный тип ламп был выбран согласно необходимому освещению рабочей зоны для работ высокой точности [90].

Размещение светильников в помещении определяется следующими параметрами:  $H = 3$  – высота помещения (м);  $h_c = 0,3$  – расстояние светильников от перекрытия (свес) (м);  $h_n = H - h_c = 3 - 0,3 = 2,7$  м – высота светильника над полом, высота подвеса (м);  $h_{rp} = 0,8$  – высота рабочей поверхности над полом (м). Для люминесцентных без защитной решётки типов ОД, ОДО интегральный критерий  $\lambda = 1,4$ .

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = h_n - h_p = 2,7 - 0,8 = 1,9 \quad (37)$$

где  $h_n$  – высота светильника над полом,  $h_p$  – высота рабочей поверхности над полом.

Расстояние между соседними светильниками или рядами определяется по формуле:

$$L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 1,9 = 2,66 \quad (38)$$

Количество рядов светильников с люминесцентными лампами определяется по формуле

$$n_{\text{ряд}} = \frac{(B - \frac{2}{3}L)}{L} + 1 = 2,21 \approx 2 \quad (39)$$

где  $n_{\text{ряд}}$  – количество рядов;  $B$  – ширина помещения, м.

Количество светильников с люминесцентными лампами определяется по формуле:

$$n_{\text{св}} = \frac{(A - \frac{2}{3}L)}{l_{\text{св}} + 0,5} = 2,07 \approx 2 \quad (40)$$

где  $n_{\text{св}}$  – количество светильников в ряду;  $A$  – длина помещения, м.

Общее количество светильников с люминесцентными лампами в помещении определяется по формуле:

$$N = n_{\text{ряд}} \cdot n_{\text{св}} \cdot 2 = 8 \quad (41)$$

Светильники размещаются в два ряда. В каждом ряду можно установить 4 светильника типа ОД мощностью 80 Вт. План помещения и размещения светильников представлен на рисунке 46.

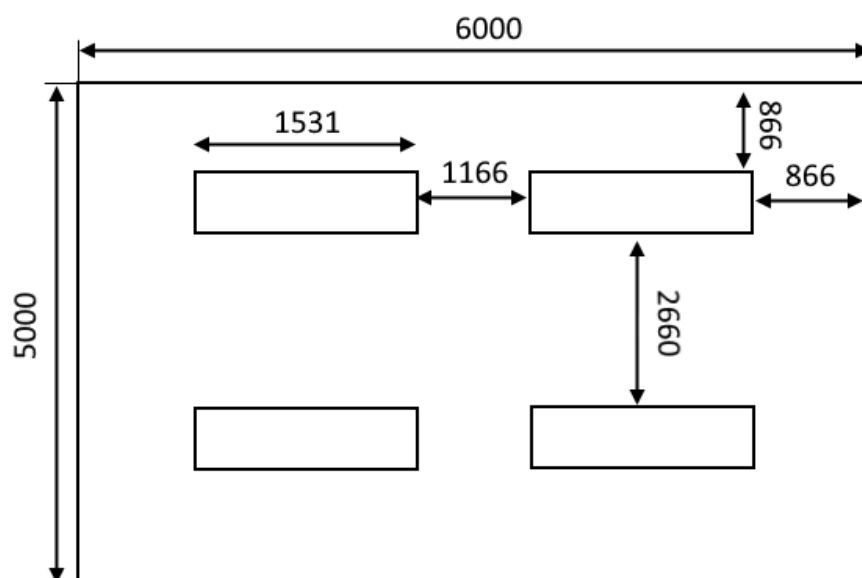


Рисунок 46 – План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами

Расчет общего равномерного уровня искусственного освещения горизонтальной поверхности рабочего места производится способом коэффициента светового потока по формуле:

$$\Phi = \frac{E_H \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N_{\text{л}} \cdot \eta} = \frac{400 \cdot 30 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{8 \cdot 0,56} = 4537 \text{ лм} \quad (42)$$

где  $E_H$  – нормируемая минимальная освещённость по СНиП23-05-95\*,  $S$  – площадь освещаемого помещения,  $\text{м}^2$ ;  $K_3$  – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника (источника света, светотехнической арматуры, стены прочее, т.е. отражающих поверхностей), наличие в атмосфере цеха дыма, пыли,  $K_3=1,5$  (Помещения с малым выделением пыли);  $Z$  – коэффициент неравномерности освещения, отношение  $E_{\text{ср}} / E_{\text{min}}$ . Для люминесцентных ламп при расчётах берётся равным 1,1;  $N$  – число ламп в помещении;  $\eta$  – коэффициент использования светового потока.

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от



индекса помещения  $i$ , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью  $h$  и коэффициентов отражения стен  $\rho_c$  и потолка  $\rho_n$ .

Находим индекс помещения:

$$i = \frac{S}{h(A+B)} = \frac{30}{1,9 \cdot (6+5)} = 1,44 \quad (43)$$

Коэффициент отражения стен (свежепобеленное состояние стен с окнами без штор):  $\rho_c = 50 \%$ . Коэффициент отражения потолка (свежепобеленное состояние потолка):  $\rho_n = 70 \%$ .

Делаем проверку выполнения условия:

$$\begin{aligned} -10\% \leq \frac{\Phi_{\text{ЛД}} - \Phi_{\text{П}}}{\Phi_{\text{ЛД}}} \cdot 100\% \leq 20\%, \\ \frac{\Phi_{\text{ЛД}} - \Phi_{\text{П}}}{\Phi_{\text{ЛД}}} \cdot 100\% = \frac{4250 - 4537}{4250} \cdot 100\% = -6,7\% \end{aligned} \quad (44)$$

Таким образом:  $-10\% \leq -6,7\% \leq 20\%$ , необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

Таким образом, электрическая мощность осветительной установки:

$$P = 8 \cdot 80 = 640 \text{ Вт} \quad (45)$$

#### 5.2.1.4 Отклонение показателей микроклимата

Источник возникновения фактора: тепловая нагрузка среды на организм человека в условиях лабораторного помещения. Согласно СанПиН 2.2.4.548–96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [91], для создания нормальных условий труда в производственных помещениях необходимо обеспечить в помещении оптимальные и допустимые

микроклиматические условия. Допустимые микроклиматические условия допускаются в случае, если оптимальные не могут быть достигнуты.

К показателям микроклимата относятся:

- относительная влажность воздуха;
- интенсивность теплового излучения;
- скорость движения воздуха;
- температура поверхностей;
- температура воздуха.

Категории работ разграничиваются на основе интенсивности энерготрат организма в ккал/ч (Вт). По данным [92] работы помещения лаборатории относятся к категории Па – это работы с интенсивностью энерготрат 151-200 ккал/ч (175-232 Вт), связанные с постоянной ходьбой, перемещением мелких (до 1 кг) изделий или предметов в положении стоя или сидя и требующие определенного физического напряжения.

Таблица 21 – Оптимальные параметры микроклимата

Период года		Категория работ		Параметры воздушной среды на рабочих местах	
Температура воздуха, 0С		Температура поверхностей, 0С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с	
Холодный	Па(175-232)	19-21	18-22	40-60	0,2
Теплый	Па(175-232)	20-22	19-23	40-60	0,2

Таблица 22 – Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года		Категория работ		Температура воздуха, 0С		Температура поверхностей, °С		Относительная влажность, %		Скорость движения воздуха, м/с	
ниже оптимальных		выше оптимальных		ниже оптимальных		выше оптимальных					
Холодный	Па(175-232)	17,0-18,9	21,1-23,0	16,0-24,0	15-75	0,1	0,3				
Теплый	Па(175-232)	18,0-19,9	22,1-27,0	17,0-28,0	15-75*	0,1	0,4				

При температурах воздуха 25 °С и выше максимальные величины относительной влажности воздуха должны приниматься в соответствии с СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [92]. Влияние теплового излучения от технологического оборудования на персонал называют тепловым облучением. Для людей на рабочих местах допустимые величины интенсивности теплового облучения от производственных источников, нагретых до темного свечения должны соответствовать значениям из таблицы 23.

Таблица 23 – Допустимые величины интенсивности теплового облучения поверхности тела работающих от производственных источников

Облучаемая поверхность тела, %	Интенсивность теплового облучения, Вт/кв. м, не более
50 и более	35
25 - 50	70
не более 25	100

При наличии теплового облучения работающих, температура воздуха на рабочих местах категории Па не должна превышать 22 °С.

Благоприятные параметры микроклимата в лабораторных помещениях достигаются за счет:

- Вентиляции и отопления;
- Применения средств индивидуальной защиты;
- Организации защиты от тепловых излучений, которая способствует снижению температуры воздуха в помещении.

#### **5.2.1.5 Статические физические нагрузки**

Статическая физическая нагрузка при работе с вакуумной машиной ПВ-3012М с затратой человеком усилий без перемещения тела или отдельных его частей. Статическая нагрузка характеризуется величиной удерживаемого груза, так как основным грузом для человека оператора установки ПВ-3012М являются исследовательские образцы, то чаще всего масса образцов довольно мала, так как образцы чаще всего имеют малый размер. Поэтому работу на установке можно отнести к оптимальному классу условий труда, так как физическая нагрузка легкая [93], то есть допускается до 50 наклонов за смену, стереотипные рабочие движения кистей и пальцев рук до 20000 и перемещение в пространстве до 4 км [93]. К средствам индивидуальной защиты от статических нагрузок можно отнести правильное расположения человека при работе сидя, эргономическое кресло и т.д.[94, 95]

#### **5.2.2 Анализ опасных факторов производственной среды**

##### **5.2.2.1 Повышенная напряженность электрического поля**

Данная магистерская диссертация была выполнена с использованием ПЭВМ и научно-исследовательской установки ПВ-3012М, которые являются

источниками электромагнитного излучения. Длительное систематическое воздействие электромагнитных полей на организм человека приводит к функциональным изменениям, нарушениям процессов в ЦНС, сбоям в работе сердечнососудистой системы.

Предельно допустимый уровень напряженности воздействующего электромагнитного поля согласно ГОСТ 12.1.002-84 [96] составляет 25 кВ/м. Пребывание в электромагнитном поле напряженностью более предельно допустимого значения без применения средств защиты не допускается. Пребывание в поле напряженностью до 5 кВ/м включительно допускается в течение рабочего дня. При напряженности свыше 20 до 25 кВ/м время пребывания персонала не должно превышать 10 мин.

К средствам индивидуальной защиты от электромагнитного излучения относятся комбинезоны, халаты и фартуки из специальной металлизированной ткани, осуществляющие защиту организма человека по принципу сетчатого экрана.

#### **5.2.2.2 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может пройти через тело человека**

Вакуумная установка ПВ-3012М относится к электроустановкам с номинальным напряжением до 1000 В (помещения без повышенной опасности). Для обеспечения безопасности работы на электрических установках проводятся следующие организационные мероприятия, прописанные в ГОСТ 12.1.019-79 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты [97]. К техническим способам обеспечения электробезопасности относят: защитные оболочки; защитные ограждения; безопасное расположение токоведущих частей; изоляцию токоведущих частей; изоляцию рабочего места; предупредительную сигнализацию, блокировку, знаки безопасности. К средствам индивидуальной защиты относятся заземление и разделение электрической сети с помощью трансформаторов более подробно описано в

ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление [98]. Согласно ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов [99] предельно допустимым уровнем напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека при взаимодействии их с переменным током частотой 50 Гц, является значение 2 В и 0,3 мА, соответственно.

### **5.3 Охрана окружающей среды**

Во время работы на вакуумной установке ПВ-3012М используются пластинчато-роторный и диффузионный насосы, оснащенные фильтрами, улавливающими масло и масляные пары. После выработки своего ресурса фильтры сдаются на утилизацию. Для защиты атмосферы от паров масла необходимо, чтобы при эксплуатации пластинчато-роторных насосов отвечала всем требованиям ГОСТ Р 53481-2009 Системы смазочные. Требования безопасности [100].

Возникающие в процессе научно-исследовательской работы мелкие твердые бытовые отходы (такие как бумага, орг.техника, светильники) идут на хранение и утилизацию на специальных мусорных полигонах. Бумага сначала складывается и упаковывается, после отправляется в пункт приема макулатуры, после которого она идет на переработку. Люминесцентные лампы сдаются и в дальнейшем утилизируются. Орг.техника сдается в специальные учреждения, в которых происходит их разбор на составляющие и последующая переработка или утилизация. Выход из строя ПЭВМ относится к VI классу опасности и подлежит специальной утилизации. Процедура утилизации должна соответствовать ГОСТ Р 53692-2009 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов. [100]

## 5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Согласно НПБ 105-03 [101] по взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1-В4, Г и Д, а здания - на категории А, Б, В, Г и Д. Помещение лаборатории в котором проводилось исследование относится к категории А – вещества и материалы, способные взрываться и гореть при взаимодействии с водой или кислородом воздуха. Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам электрического характера, в том числе: короткое замыкание, перегрузки по току, статическое электричество и т. д.

Согласно ГОСТ 12.1.004-91 [102], для устранения причин возникновения и локализации пожаров в лаборатории должны проводиться следующие мероприятия: использование только исправного оборудования; проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности; отключение электрооборудования, освещения и электропитания при предполагаемом отсутствии обслуживающего персонала или по окончании работ; содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии.

При возникновении возгорания необходимо немедленно прекратить работу, отключить электрооборудование, позвонить в подразделение пожарной охраны по телефону 01 или 010, сообщить о случившемся руководителю подразделения и приступить к тушению огня первичными средствами пожаротушения. В лаборатории расположены огнетушители порошковые ОП-4(з) – АВСЕ02 (предназначены для тушения твердых, жидких и газообразных веществ и электроустановок до 1000В). Причинами возникновения пожара могут быть: нарушение правил эксплуатации электрического оборудования; курение в неустановленных местах; перегрузка электрических сетей; нарушение правил пожарной безопасности.

#### **5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований**

При возникновении неисправностей в работе на установке ПВ-3012М необходимо выполнить следующие действия:

1. отключить питание компьютера;
2. отключить диффузионный и пластинчато-роторный насосы;
3. отключить печь с термопарами;
4. закрыть клапан подачи воды;
5. известить об этом вышестоящего руководителя.

При возникновении возгорания необходимо немедленно прекратить работу, отключить электрооборудование, позвонить в подразделение пожарной охраны по телефону 01 или 112, сообщить о случившемся руководителю подразделения и приступить к тушению огня первичными средствами пожаротушения.

При поражении работника электрическим током необходимо как можно скорее освободить пострадавшего от воздействия электрического тока, проверить состояние пострадавшего и вызвать при необходимости скорую помощь, до приезда скорой помощи оказать пострадавшему необходимую первую помощь или, при необходимости, организовать доставку пострадавшего в ближайшее лечебное учреждение, о произошедшем несчастном случае поставить в известность руководителя структурного подразделения.

#### **5.4.2. Разработка порядка действия в случае возникновения ЧС**

Самым распространенным видом ЧС является пожар. Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, статическое электричество и т. д. Для устранения причин возникновения и локализации пожаров в помещении лаборатории должны проводиться следующие мероприятия:



- 1 использование только исправного оборудования;
- 2 проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;
- 3 отключение электрооборудования, освещения и электропитания при предполагаемом отсутствии обслуживающего персонала или по окончании работ;
- 4 содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии.



Рисунок 47 – План эвакуации при пожаре и других ЧС из помещений лаборатории ИФПМ со РАН корпус №2, 1 этаж

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды.

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует

располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей.

Здание должно соответствовать требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации, порошковых или углекислотных огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к выходу.

## **Вывод по главе 5**

В данном разделе были рассмотрены необходимые правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, в которых регламентируются условия труда, необходимые инструкции по работе со специальным оборудованием, а также гигиенические требования к организации работы. В целях практической работы, был произведен расчет искусственной освещенности рабочей зоны помещения, в котором располагается вакуумная установка ПВ-3012М. Были выявлены и проанализированы опасные и вредные факторы производственной среды. К факторам рабочего места, влияющим на окружающую среду, относятся масляные пары из насосов установки ПВ-3012М. Для предотвращения негативного влияния эксплуатации установки используются необходимые фильтры. Установка ежегодно проходит поверку и аттестацию. Также были рассмотрены различные чрезвычайные ситуации при работе на вакуумной установке ПВ-3012М и правильный порядок действий при их возникновении.

## Заключение

В теоретической части было изучено, что методы ИПД позволяют получать в титане и его сплавах УМЗ состояние, обладающее высокими прочностными характеристиками при сохранении технологической пластичности. По методу Виккерса была измерена микротвердость титанового сплава в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состоянии с различной концентрацией водорода. Были проведены исследования структурно-фазового состояния титанового сплава ВТ16 и ВТ16-Н. При анализе экспериментальных данных было установлено, что механические свойства зависят от концентрации водорода и структуры сплава. Водород повышает предел текучести за счет скопления водорода в наиболее напряженных участках образца. В интервале более высоких температур (573 – 973) К присутствие водорода в твердом растворе приводит к повышению температуры перехода ультрамелкозернистого сплава ВТ16 в сверхпластическое состояние на 50 К и уменьшению температурного интервала проявления его сверхпластических свойств.

В процессе формирования бюджета НИР были использованы группировки по материальным затратам, затратам на социальное оборудование, затратам по основной заработной плате, затратам по дополнительной заработной плате, отчислениям во внебюджетные фонды. Всего бюджет с учетом прибыли и НДС составил 439097,5 рублей. Однако, оценка его экономического эффекта и эффективности не корректна.

В процессе рассмотрения безопасности и гигиены труда при осуществлении работ с вакуумной установкой ПВ-3012М были выявлены опасные и вредные факторы рабочей зоны, их причины и средства защиты от чрезвычайных ситуаций.

### Список используемой литературы:

1. Валиев, Р.З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура, свойства / Р.З. Валиев, И.В. Александров - М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. - 398 с.
2. Колачев Б. А. Водородная хрупкость цветных металлов // М. : Металлургия. – 1966. – 256 с.
3. Валиев Р. З., Александров И. В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией // М.: Логос. – 2000. – 272 с.
4. Ливанов В.А., Буханова А.А., Колачев Б.А. Водород в титане. – М.: Металлургиздат, 1962. – 246 с.
5. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Буханова А.А. Механические свойства титана и его сплавов. - М.: Металлургия, 1974. -544 с.
6. Choo W.Y., Lee J.Y. Thermal analysis of trapped hydrogen in pure iron // Metallurgical and Materials Transactions A. – 1982. Т. 13. – № 1. С. 135-140.7
7. Колачёв Б. А. и др. Достижения водородной технологии титановых сплавов //Технология легких сплавов. – 2007. – №. 3. – С. 10-26.
8. Бриджмен П. Исследование больших пластических деформаций и разрушения //М.: ИИЛ. – 1955.
9. Кузнецов Р. И., Быков В. И., Чернышев В. П. Пластическая деформация твердых тел под давлением—Свердловск //Препринт. – 1982. – Т. 4. – С. 85
10. Смирнова Н.А., Левит В.И., Пилюгин В.И., Кузнецов Р.И., Давыдова Л.С., Сазонова В.А. Эволюция структуры гцк монокристаллов при больших пластических деформациях// ФММ. 1986. - Т.61. - С.1170-1177.
11. Рааб Г. И. Развитие научных основ технологий интенсивной пластической деформации и создание оборудования по схеме

равноканального углового прессования для получения ультрамелкозернистых металлических полуфабрикатов : дис. – Магнитогорский государственный технический университет им. ГИ Носова, 2009.

12. Langdon, T. G. The principles of grain refinement in equal-channel angular pressing / T. G. Langdon // *Materials Science and Engineering*. – 2007. – A 462. – P. 3.

13. Ywahashi Y., Wang J., Horita Z., Nemoto M., Langdon T.G. Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultrafine grained materials // *Scripta Mater*. 1996. - V.35. - P. 143-146.

14. Салищев, Г. А. Формирование субмикрокристаллической структуры в титане при пластической деформации и ее влияние на механические свойства / Г. А. Салищев, О. Р. Валиахметов, Р. М. Галлеев // *Металлы*, – 1996. – № 4. – с. 86-91.

15. Humphreys, F.J. Developing Stable Fine-Grain Microstructures by Large Strain Deformation / F.J. Humphreys, P.B. Prangnell, J.R. Bowen, A. Gholinia, C. Harris // *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, – 1999. – vol. 357. – p. 1663-1681

16. Cvikker U. Titanium and its alloys. Moscow, Metallurgija (1979) 512 p //У. Цвиккер. Титан и его сплавы. Москва, Металлургия. – 1979.

17. Ильин А.А. Водородная технология титановых сплавов/ Б.А. Колачев, В.К. Носов, А.М. Мамонов.- М.: «МИСиС», 2002. – 392 с.

18. Robertson I.V. The effect of hydrogen on dislocation dynamics // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2001. – V. 68. – P. 671 – 692.

19. Мазурский М.И., Мурзинова М.А., Салищев Г.А., Афоничев Д.Д. Использование водородного легирования для формирования субмикрокристаллической структуры в двухфазных титановых сплавах // *Металлы*. 1995. - №6. - С.83

20. Yoshimura H., Nakahigashi J. Tensile and impact properties of mesoscopic-grained  $\alpha + \beta$ -type titanium alloys obtained through hydrogen treatments // *Journal of alloys and compounds*. – 1999. – Т. 293. – С. 858-861.
21. Валиев Р. З. Развитие равноканального углового прессования для получения ультрамелкозернистых металлов и сплавов // *Металлы*. – 2004. – №. 1. – С. 15-22.
22. Колобов Ю.Р., Кашин О.А., Сагымбаев Е.Е., Дударев Е.Ф., Бушнев Л.С., Грабовецкая Г.П., Почивалова Г.П., Гирсова Н.В., Столяров В.В. Структура, механические и электрохимические свойства ультрамелкозернистого титана // *Изв. вузов. Физика* 2000 №1 с 77-85.
23. Grabovetskaya G.P., Kolobov Yu.R., Ivanov K.V., Girsova N.V. Structure and Creep Behavior of Nanostructured Materials Produced by Severe Plastic Deformation // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2002. – V. 94. – Suppl. 2. – P. S37 – S44.
24. Саитова Л. Р., Семенова И. П., Александров И. В. Исследование однородности структуры заготовок из сплава ВТ6, подвергнутого равноканальному угловому прессованию // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки*. – 2004. – №. 27.
25. Грабовецкая Г. П. и др. Эволюция структурно-фазового состояния сплава Ti-6Al-4V в процессе формирования субмикроструктурной структуры с использованием обратимого легирования водородом // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2006. – Т. 49. – №. 4. – С. 86-91.
26. Колобов Ю. Р., Голосов Е. В., Раточка И. В. Особенности субмикроструктурной структуры и ее влияние на механические свойства титановых сплавов. – 2008.
27. Грабовецкая Г.П., Раточка И.В., Мишин И.П., Забудченко О.В., Лыкова О.Н. Эволюция структурно-фазового состояния титанового сплава системы Ti-Al-V-Mo в процессе интенсивной пластической

- деформации и последующих отжигов // Известия высших учебных заведений. Физика.– 2016.– Т.59, №1.– С. 92–97.
28. Straumal B. B. et al. Diffusive and displacive phase transitions in Ti–Fe and Ti–Co alloys under high pressure torsion //Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Т. 735. – С. 2281-2286.
29. Kriegel M. J. et al. Transformation Pathway upon Heating of Ti–Fe Alloys Deformed by High-Pressure Torsion //Advanced Engineering Materials. – 2018. – Т. 20. – №. 4. – С. 1700933.
30. Kilmametov A. et al. Transformations of  $\alpha'$ martensite in Ti–Fe alloys under high pressure torsion //Scripta Materialia. – 2017. – Т. 136. – С. 46-49.
31. Kilmametov A. R. et al. The  $\alpha \rightarrow \omega$  and  $\beta \rightarrow \omega$  phase transformations in Ti–Fe alloys under high-pressure torsion //Acta Materialia. – 2018. – Т. 144. – С. 337-351
32. Kilmametov A. R. et al. The  $\alpha \rightarrow \omega$  transformation in titanium-cobalt alloys under high-pressure torsion //Metals. – 2018. – Т. 8. – №. 1. – С. 1.
33. Грабовецкая Г.П., Степанова Е.Н., Раточка И.В., Найденкин Е.В. Лыкова О.Н.. Структура и механические свойства ультрамелкозернистого сплава Ti-6Al-4V, полученного с использованием обратимого легирования водородом // Перспективные материалы.–2012.– №5.– С. 21-27
34. Laptev R. et al. Positron Spectroscopy of Hydrogen-Loaded Ti-6Al-4V Alloy with Different Defect Structure // Acta Physica Polonica, A. – 2020. – Vol. 137. – № 2.
35. Stepanova E. et al. Effect of hydrogen on the structural and phase state and defect structure of titanium alloy // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2016. – Vol. 1772. – № 1. – P. 030016
36. Meyers M. A., Mishra A., Benson D. J. Mechanical properties of nanocrystalline materials //Progress in materials science. – 2006. – Т. 51. – №. 4. – С. 427-556



37. Дударев Е.Ф., Бакач Г.П., Колобов Ю.Р., Грабовецкая Г.П. Кашин О.А., Чернова Л.В. Деформационное поведение и локализация пластической деформации на мезо- и макромасштабном уровнях в субмикроструктурном титане // Физическая мезомеханика 2001, т.4, №1, с. 97-104
38. Raab G. J. et al. Continuous processing of ultrafine grained Al by ECAP–Conform // Materials Science and Engineering: A. – 2004. – Т. 382. – №. 1-2. – С. 30-34
39. Колобов Ю. Р. и др. Зернограничная диффузия и свойства наноструктурных материалов. – 2001
40. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. Физическая мезомеханика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. I. Физические основы многоуровневого подхода // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9. – №3. – С.9–22.
41. Грабовецкая Г. П. и др. Влияние холодной пластической деформации на структуру, деформационное поведение и механические свойства ультрамелкозернистого титана // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – №. S2.
42. Жеребцов С. В. и др. Механические и технологические свойства ультрамелкозернистого двухфазного титанового сплава ВТ6, полученного всесторонней изотермической деформацией // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2012. – Т. 16. – №. 7 (52).
43. Grabovetskaya G. P. et al. Thermal Effect on the Structural and Phase Condition and Mechanical Properties of Ultrafine-Grained Titanium Alloy VT16 in the Temperature Range of 293–923 K // Metal Science and Heat Treatment. – 2019. – Т. 60. – №. 9-10. – С. 580-588.
44. Naydenkin E. V., Grabovetskaya G. P. Deformation behavior and plastic strain localization of nanostructured materials produced by severe plastic

- deformation //Materials Science Forum. – Trans Tech Publications Ltd, 2010. – T. 633. – C. 107-119.
45. Gu Y. et al. Simultaneously improving mechanical properties and corrosion resistance of pure Ti by continuous ECAP plus short-duration annealing //Materials Characterization. – 2018. – T. 138. – C. 38-47
46. Grabovetskaya G., Mishin I., Zabudchenko O. Deformation behavior and fracture of the ultrafine-grained titanium alloy of Ti-Al-V-Mo system //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2015. – T. 1683. – №. 1. – C. 020059.
47. Новиков И. И., Портной В. К. Сверхпластичность сплавов с ультрамелким зерном //Металлургия. – 1981. – Т. 168.
48. Mukherjee A. K. The rate controlling mechanism in superplasticity //Materials Science and Engineering. – 1971. – Т. 8. – №. 2. – C. 83-89.
49. Dudarev E. F. et al. Diffusion-controlled true grain-boundary sliding in nanostructured metals and alloys //Materials Science and Engineering: A. – 2009. – Т. 503. – №. 1-2. – C. 58-61.
50. Naydenkin E. V., Grabovetskaya G. P., Ivanov K. V. The Effect of Grain Boundary State on Deformation Process Development in Nanostructured Metals Produced by the Methods of Severe Plastic Deformation //Materials Science Forum. – Trans Tech Publications Ltd, 2011. – Т. 683. – C. 69-79.
51. Motyka M., Sieniawski J., Ziaja W. Microstructural aspects of superplasticity in Ti-6Al-4V alloy //Materials Science and Engineering: A. – 2014. – Т. 599. – C. 57-63.
52. Mukherjee A. K. The rate controlling mechanism in superplasticity //Materials Science and Engineering. – 1971. – Т. 8. – №. 2. – C. 83-89.
53. Bochvar A.A., Sviderskaya Z.A. On different mechanisms of plasticity in metal alloys // Proceedings of the Academy of Sciences of USSR. Department of Technical Sciences. - 1948. - № 5. - p. 649 – 653.
54. M. F. Ashby, R. A. Verrall. Diffusion-Accommodated Flow and Superplasticity., Acta Met. 1973, vol. 21(2), pp. 149-163.

55. Gifkins R.C. Grain-boundary sliding and its accommodation during creep and superplasticity // Metallurgical Transactions. – 1976. – V. 7A. – № 8. – P. 1225 – 1232.
56. H. Matsumoto, K. Yoshida, S-H. Lee, Y. Ono, A. Chiba, Ti-6Al-4V alloy with an ultrafine-grained microstructure exhibiting low-temperature-high-strain-rate superplasticity, Mater Let 98 (2013) 209-212.
57. M. Ashida, P. Chen, H. Doi, Y. Tsutsumi, T. Hanawa, Z. Horita, Superplasticity in the Ti-6Al-7Nb alloy processed by high-pressure torsion, Mater Sci Eng A 640 (2015) 449-453.
58. Ratochka I. , Lykova O. , Mishin I. , Naydenkin E. Superplastic deformation behavior of Ti-4Al-2V alloy governed by its structure and precipitation phase evolution // Materials Science and Engineering A . - 2018. - Vol. 731. - P. 577-582.
59. Matsumoto H., Velay V., Chiba A. Flow behavior and microstructure in Ti-6Al-4V alloy with an ultrafine-grained  $\alpha$ -single phase microstructure during low-temperature-high-strain-rate superplasticity // Materials & Design. – 2015. – Vol. 66. – P. 611-617.
60. G.P. Grabovetskaya, I.P. Mishin, E.N. Stepanova b, O.V. Zabudchenko, I.V. Ratochka Effect of the structural and phase state on the deformation behavior and mechanical properties of the ultrafine-grained titanium alloy (Ti-Al-V-Mo) at temperatures in the range of 293–973 K// Materials Science & Engineering A 2021 Vol. 800 №140334.
61. Ильин А.А. Механизмы и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах. - М.: Наука, 1994. – 304 с.
62. Ильин А.А., Носов В.К. К вопросу о соотношении прочности  $\alpha$  - и  $\beta$  -фаз в титановых сплавах при разной температуре // ДАН СССР, 1988, Т. 301, №1. – С. 134–138.
63. Лидер, А.М. Аннигиляция позитронов в насыщенном водородом титане / К.П. Арефьев, О.В. Боев, О.Н. Имас, А.М. Лидер, А.С. Сурков, И.П. Чернов // Физика твердого тела. 2003. – Т. 45, № 1. – С. 3–7.

64. Rajainmaki, H. Defect recovery and hydrogen-vacancy interactions in nickel between 20 and 650 K / H. Rajainmaki, S Linderöth, H.E. Hansen, R.M. Nieminen // Journal of Physics F: Metal Physics. IOP Publishing, 1988. – Vol. 18, № 6. – P. 1109–1118.
65. Лидер, А.М. Динамика накопления водорода и дефектов в титане и нержавеющей стали при электролитическом насыщении водородом: дисс...канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / А.М. Лидер. – Томск, 2002. – 149 с. 66.
66. Лидер А. М. Позитронная спектроскопия для контроля микроструктурных изменений в системах "металл-водород": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: спец. 05.11.13 : дис. – 2017.
67. Гельд, П.В. Водород и несовершенства структуры металла / П.В. Гельд, Е.С. Кодес, Р.А. Рябов. 1979. – 221 с.
68. Мельникова Е. Н., Грабовецкая Г. П., Колобов Ю. Р. Влияние водорода на деформационное поведение и разрушение сплава Ti-6Al-4V // Деформация и разрушение материалов. – 2008. – №. 9. – С. 26-31.
69. Грабовецкая Г. П., Мельникова Е. Н., Чернов И. П. Структурно-фазовое состояние и механические свойства субмикроструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V, полученного с использованием обратимого легирования водородом // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2007. – Т. 311. – №. 2.
70. Li X. et al. Effect of hydrogen on the microstructure and superplasticity of Ti-55 alloy // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42. – № 9. – P. 6338-6349.
71. Мурзинова М. А., Салищев Г. А., Афоничев Д. Д. Сверхпластичность титанового сплава ВТ6, легированного водородом, с субмикроструктурной структурой // Физика металлов и металловедение. – 2007. – Т. 104. – №. 2. – С. 204-211.

72. R.Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, T.G. Langdon, M.J. Zehetbauer & Y.T. Zhu Fundamentals of Superior Properties in Bulk NanoSPD Materials// Materials Research Letters 2017, V. 4:№1, P. 1-21.
73. E.V. Naydenkin, I.V. Ratochka, G.P. Grabovetskaya. The Aspects of Practical Application of Ultrafine-Grained Titanium Alloys Produced Severe Plastic Deformation // Journal of Materials Science Forum.– 2011.–Vol. 667-669.– P. 1183-1188.
74. Валиев Р.З., Ислагалиев Р.К., Юнусова Н.Ф. Сверхпластичность наноструктурных металлических материалов, полученных методами интенсивной пластической деформации // МиТОМ. – 2006. – № 2 (608). – С. 5–10.
75. Бобылев С. В., Овидько И. А. Аккомодация зернограничного скольжения и повышение трещиностойкости в деформируемых нанокристаллических материалах// Materials Physics & Mechanics. – 2016. – Т. 29, №. 1. – С. 43–70
76. Grabovetskaya G. P. et al. Effect of hydrogen on the formation of structure and mechanical properties of the ultrafine-grained titanium alloy of Ti–Al–V–Mo system//AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2018. – Т. 2051. – №. 1. – С. 020101
77. T.G. Langdon. Grain boundary sliding revisited: Developments in sliding over four decades. J Mater. Sci. 41 (2006) 597–609.[doi.org/10.1007/s10853-006-6476-0](https://doi.org/10.1007/s10853-006-6476-0)
78. O.V. Zabudchenko, G.P. Grabovetskaya, I.P. Mishin, E.N. Stepanova Effect of hydrogen on the deformation development in the titanium alloy with a hierarchical ultrafine-grained structure in the temperature range of 293-973 K.// AIP Conference Proceedings. 2019.–2167, 02039680
79. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019).

80. ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения).
81. инструкция № 2-14 по охране труда при работе с электрооборудованием напряжением до 1000 В
82. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
83. ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.
84. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация
85. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки
86. ГОСТ 12.1.029-80. Средства и методы защиты от шума
87. СН 2.2.4/2.1.8.566–96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий.
88. СанПиН 2.2.4.3359-16 Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах
89. ГОСТ 12.4.002-97 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты рук от вибрации. Технические требования и методы испытаний
90. СНиП 23-05-95\* Естественное и искусственное освещение [Текст] - Москва: ССтандартинформ, 2018. – 121 с.
91. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
92. Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 24 января 2014 г. N 33н "Об утверждении Методики проведения специальной оценки условий труда, Классификатора вредных и (или) опасных

производственных факторов, формы отчета о проведении специальной оценки условий труда и инструкции по ее заполнению" (с изменениями и дополнениями).

93. ГОСТ 21889-76 Система «Человек-машина». Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования.

94. ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования.

95. ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности.

96. ГОСТ 12.1.019-79 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

97. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.

98. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов

99. ГОСТ Р 53481-2009 Системы смазочные. Требования безопасности

100. ГОСТ Р 53692-2009 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов

101. НПБ 105-03 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.

102. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования

## Приложение А

### Раздел 1 Теоретическая часть

---

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ91	Хованова Анастасия Олеговна		

Руководитель ВКР (НОЦ) – Экспериментальной физики:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ	Степанова Екатерина Николаевна	к.т.н.		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ ШБИП	Зяблова Наталия Николаевна	к.ф.н.		



### **Introduction**

Titanium alloys due to their high corrosion resistance, biocompatibility and low specific strength are promising structural materials. These alloys are already widely used in marine shipbuilding, aerospace industry, and in medicine. However, the development of aerospace and automobile equipment requires further improvement of the specific strength of titanium alloys. One of the ways to increase the specific strength of titanium alloys at low homological temperatures is the formation of ultra-fine grained (UFG) structures (grain size  $d < 1 \mu\text{m}$ ) by methods of severe plastic deformation (SPD) [1]. Titanium alloys are hard-to-deform materials, so the plasticizing effect of hydrogen is often used to refine their structure using deformation [2, 3]. The presence of hydrogen in titanium alloys in the process of deformation structure milling can lead to an increase in the volume fraction of  $\beta$ -phase and redistribution of alloying elements, which has a significant effect on the morphology and properties of the structure formed as a result of deformation.

The presence of hydrogen in titanium alloys can have not only plasticizing but also embrittlement effects. At room temperature, this is due, first of all, to the formation of hydrides [4]. At elevated temperatures (above 623 K) the hydrides completely dissolve in titanium alloys. However, free hydrogen, having a high diffusive mobility in the metals, can redistribute in the volume under the action of elastic stress fields, forming clusters and pores in the most stressed areas, thereby reducing the strength of the metal [5]. In titanium alloys, the redistribution of hydrogen during operation can lead to the formation of hydrides and, as a consequence, premature failure. It is now known [6] that the reduction of grain size contributes to an increase in the rate of hydrogen sorption by polycrystals. Therefore, there is a need to study the influence of hydrogen on the formation of UFG structure in titanium alloys with the use of SPD methods.

### **1. Ultrafine grained structure and methods of its obtaining**

There are a lot of methods for obtaining the ultrafine grain state in materials, among which the most widespread are the SPD methods. They allow obtaining ultrafine grain structure in bulk samples and blanks without disturbing the continuity of the material. Below is a detailed description of these methods.

### **1.1 Deformation by torsion under high pressure**

The basis of this method is the Bridgman anvil method [7]. A metal sample is placed between anvils and subjected to torsional deformation at a pressure of several GPa (Fig. 1).

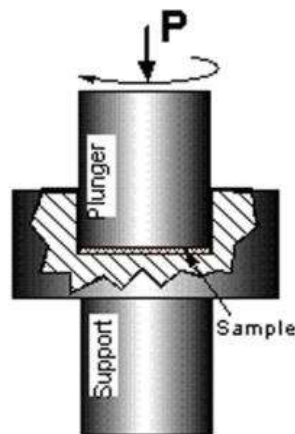


Figure 1 - Intense plastic torsional deformation [7]

The sample is deformed by shear due to rotation of the lower striker and the force of surface friction. It follows that this material will be deformed in volume under the action of applied pressure. As a result of such pressing, the specimen is not destroyed.

Samples obtained by high pressure torsional deformation are shaped as disks about (10 - 20) mm in diameter and 1 mm thick. As the results of [8] studies show, several rotations are required to create a UFG structure. The disadvantage of this method is the small volume of material in which a UFG structure can be obtained. In

addition, the resulting structure will be inhomogeneous along the radius of the sample. This is due to non-uniform deformation along the disk radius. The degrees of deformation of the sample can be calculated by the formula [9]:

$$\varepsilon_c = 2\pi \cdot R \cdot \frac{N}{h}, \quad (1)$$

where  $\varepsilon_c$ - deformation, R - distance from the sample axis, N - number of revolutions, h-thickness of the sample. The formula (1) shows that the greater the deformation of the material, the smaller the grain size with distance from the center of the disk.

## 1.2 Equal Channel Angular Pressing Method

Material blanks using the Equal Channel Angular Pressing (ECAP) method have quite large dimensions. They are usually rods with a diameter of (20 - 40) mm and a length of 100 mm to 300 mm. In special equipment, a blank is pressed through two channels with identical cross-sections, which intersect at an angle of 90° (Fig. 2) [10].

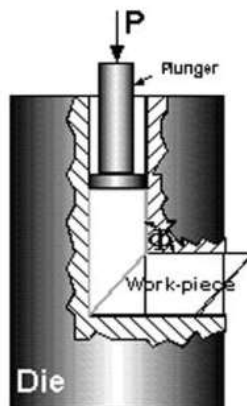


Figure 2 - Equal Channel Angular Pressing Method [10]

If the material is difficult to deform, the deformation occurs at elevated temperatures from 773 K to 823 K and at a greater number of passes through the

channels. The number of passes of the workpiece through the channels in the pressing method is very important for the formation of UFG state in the materials. For example, at least 4 passes of the sample through the channel are required to obtain the UFG structure in metallic materials. The direction of deformation is also important.

There are different routes of blanks passing through the channel (Fig. 3). Route A - the direction of the workpiece does not change during each pass (Fig. 3, a); route B - after each pass the workpiece is rotated by an angle of  $90^\circ$  (Fig. 3, b); route C - after each pass the workpiece is rotated by an angle of  $180^\circ$  (Fig. 3, c) [11]. Such varieties of routes differ in the orientation of shear during repeated passes of samples through the channels and lead to a change in the shape of the cell. In the method ECAP, route B is most common, since it is possible to obtain the most homogeneous structure with a grain size of about (0.1 - 0.8) microns in the workpieces [12].

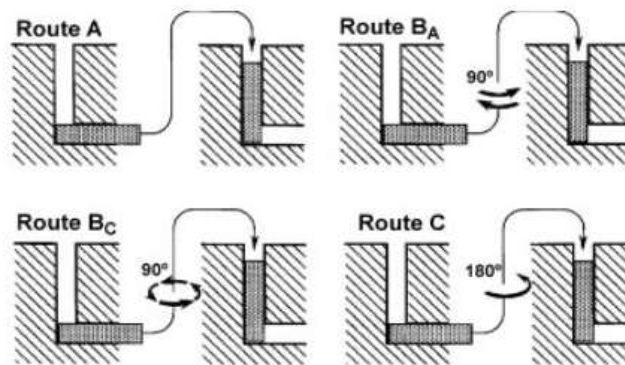


Figure 3 - Variants of ECA pressing (a - route A; b - route B; c - route C) [12]

The disadvantages of this method are the presence of grease in the channels, as well as multiple repetitions of the pressing operation, thereby contaminating the material especially at elevated temperatures.

### 1.3 Comprehensive pressing with change in the axis of deformation

The most common method for the formation of UFG structure in solid blanks is the method of all-round pressing with changing the axis of deformation. The process is based on the use of repeated operations: upsetting with a change in the axis of the applied deformed force and a gradual decrease in temperature (Fig. 4) [13].

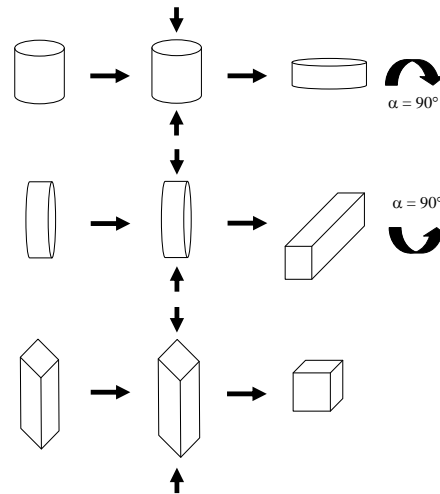


Figure 4 - Method of all-round pressing with changing axis of deformation [13]

The advantage of this method is the possibility to obtain the UFG state in rather brittle materials, as well as the absence of expensive tooling. The grain size in the resulting structure does not exceed  $0.5 \mu\text{m}$  [14].

The main disadvantage of the method of all-round pressing is multiple repetition of the cycle: deposition - change of the deformation axis (duration of exposure to the material).

#### **1.4 Combined method combining reversible hydrogen alloying and pressing**

As mentioned above, titanium alloys are difficult to deform, so the formation of the UFG structure in them by SPD methods requires large energy costs. A method representing a combination of reversible hydrogen doping and hot plastic

deformation is used as a promising method for obtaining the UFG state. This method is based on the effect of plasticizing effect of hydrogen on titanium alloys.

The positive effect of hydrogen on the plasticity of titanium and its alloys at elevated temperatures was first discovered by German scientists Zwicker and Schleicher [15]. In the work the ingots of the alloy Ti-Al were saturated with hydrogen to a concentration of 0.5 wt%. Such ingots were deformed without formation of cracks with the degree of settlement of 78 % at 1223 K. Samples that did not contain hydrogen collapsed under such conditions.

The mechanism of hydrogen plastification is due to the fact that hydrogen can lower the  $\alpha \rightarrow \beta$  transition temperature, as a result the volume fraction of  $\beta$ -phase increases. The peculiarity of the  $\beta$ -phase is the greater presence of slip systems, it deforms more easily at high temperatures [16]. Due to this, there is a plasticizing effect and a decrease in the deformation stress. In addition, hydrogen can not only induce a new slip system, it can also help to increase dislocation mobility and dislocation density; more dislocations will be involved in the slip process, which will facilitate the plastic deformation process [17]. This also promotes plasticity at high temperatures.

It was first proposed by Salischev G.A. and co-workers [18] to use a method combining pre-vaporization and warm plastic deformation to form the UFG structure in titanium alloys. Later this method was improved in [19]. The essence of this method is shown in Fig. 5. First, the alloy is annealed in hydrogen medium to a concentration of (0.2 - 0.35) wt %. Then it is deformed by one of the SPD methods at temperatures (0.4 - 0.5) of titanium melting point. As a result of prealloying, the resistance of the material to deformation is reduced, which contributes to the reduction of energy costs in obtaining the UFG structure. Then hydrogen is degassed from the material by means of vacuum annealing.

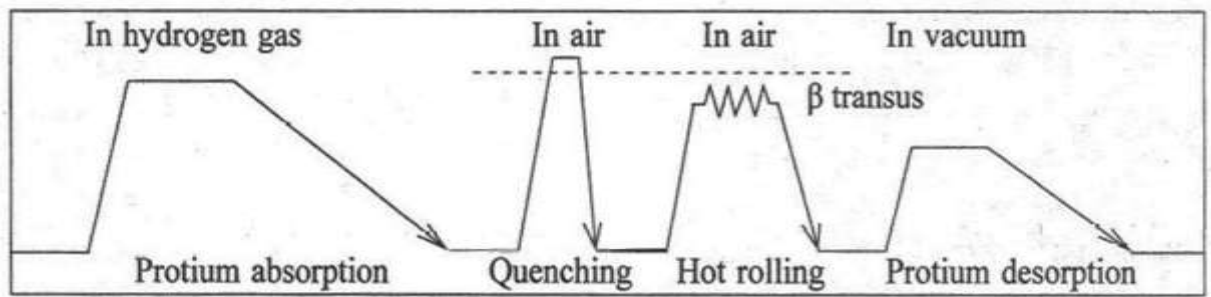


Figure 5 - Method combining reversible hydrogen doping and severe plastic deformation [19]

The disadvantage of the method is that the temperature of hydrogen degassing for some materials can exceed the recrystallization temperature of the UFG state. Therefore, it is not always possible to preserve the UFG state in such materials in billets of large volumes.

## 2 Structure and properties of titanium and its alloys in ultrafine grained state

Depending on the methods and modes of deformation, SPD methods allow to obtain in titanium and its alloys UFG structure with the average size of elements (0.1 – 0.8) microns. Such a structure refinement leads to an increase in the mechanical properties of these materials in (1.3 – 3) times. Let us consider the results of some literature studies on the structure and mechanical properties of titanium and its alloys in the UFG state.

### 2.1 Structural-phase state of titanium and its alloys in ultrafine grained state

Initially, the main methods for obtaining the UFG structure in metallic materials with grain size (0.1 – 0.8) microns were the methods of deformation by torsion under high pressure and ECAP. In [20], on the basis of a number of studies on

the UFG structure in copper and nickel, the following model of UFG structure formation in metallic materials was proposed. At the initial stage of deformation, strain hardening occurs in the material due to an increase in the dislocation density. In the course of further deformation with increasing dislocation density in the material, dislocation walls and subborders are formed which, interacting with lattice dislocations, increase misorientation to high angularity. Later, a similar change in the structure was observed in titanium during ECAP [21].

Fig. 6 shows an electron microscopic image of the UFG structure formed in VT1-0 titanium alloy by EBSD for 8 passes. Complex deformation contrast, which does not allow to distinguish individual elements of this structure, is presented in the light-field image (Fig. 6, a). At the same time, the dark-field image (Fig. 6, b) shows that the structure consists of individual elements. In the electronograms of this structure (Fig. 6, c), the reflexes are located on circles, which indicates the presence of more angular misorientations between the elements of the structure. Some reflexes have azimuthal blurring (Fig. 6, c), which is characteristic of structures with high internal stresses. The average size of the elements of the structure of titanium alloy VT1-0 determined in [21] by dark-field images in the cross section of the obtained rod was  $(0.32 \pm 0.09) \mu\text{m}$ , in the longitudinal section  $(0.7 \pm 0.28) \mu\text{m}$ . In the initial state the average grain size of VT1-0 titanium was about  $10 \mu\text{m}$ .

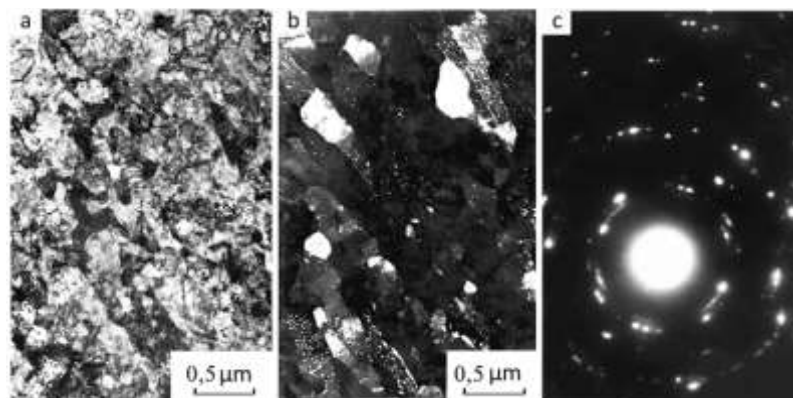


Figure 6 - Electronogram of microstructure UFG VT1-0 alloy, obtained by ECAP (a - light-field image; b - dark-field image; c - microdiffraction pattern) [21]



When studying the misorientation of the grain boundaries in UFG titanium in [22] it was found that in the cross section most of the grain boundaries (up to 70 %) have more angular misorientations. At the same time, in the longitudinal section the volume fraction of more angular boundaries does not exceed 50 %. It testifies to the formation of the structural texture in titanium during ECAP.

A similar change in the structure was observed in the VT6 titanium alloy in the process of ECAP in work [23]. The electron microscopic image of the UFG structure formed in BT6 alloy after pressing is shown in Fig. 7. The ECAP method differed in the pressing angle and the number of passes. So, on a tooling with an angle of pressing  $\varphi = 135^\circ$  at a temperature of  $700^\circ\text{C}$  the blanks withstood 12 passes without destruction, on a tooling with  $\varphi = 120^\circ$  - 8 passes.

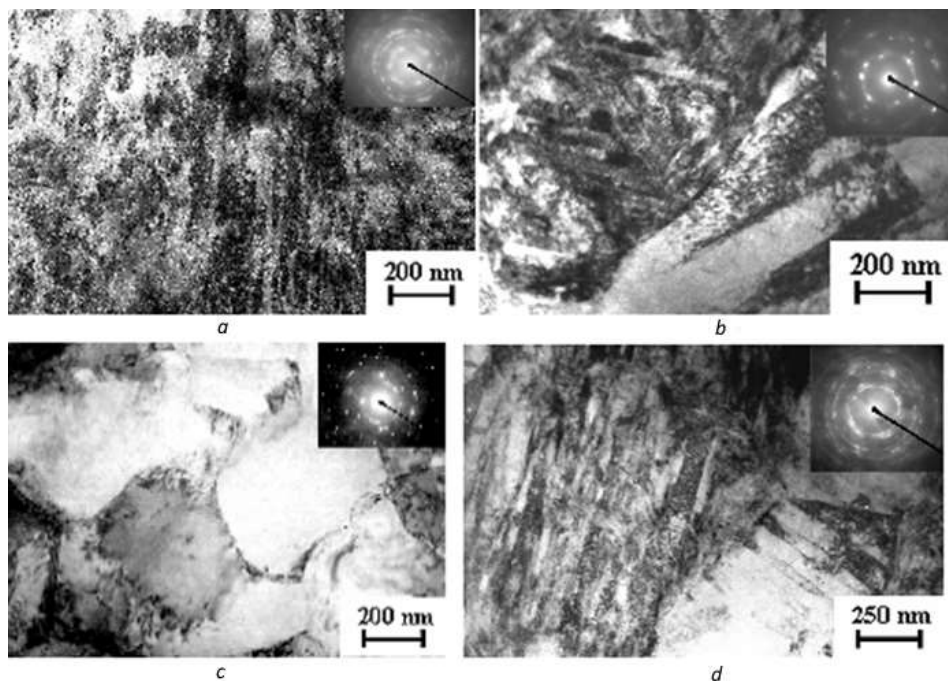


Figure 7 - Electron microscopic image of titanium alloy VT6 after ECAP:  
a -  $\varphi = 135^\circ$ , 12 passes, cross-section; b -  $\varphi = 135^\circ$ , 12 passes; longitudinal section;  
c -  $\varphi = 120^\circ$ , 8 passes; cross-section; d -  $\varphi = 120^\circ$ , 8 passes; longitudinal section [23]

It can be seen that after the ECAP on the tooling with  $\varphi = 135^\circ$  (Fig. 7 a, b) along with grain refinement, the appearance of thin (about 50 nm thick) twins located inside individual grains having a size of about (600 - 800) nm is observed. The

diffraction pattern (Fig. 7, a) contains strongly blurred reflexes, indicating high internal stresses in the structure. Judging by the diffraction picture (Fig. 7, c), the structure has many subgrains with low-angle misorientations, i.e., the UFG structure is grain-subgrain structure. Weak azimuthal blurring of point reflexes on electronograms (Fig. 7, c) indicate a decrease in internal stresses. Whereas on the electronograms (Fig. 7, d) there is a strong azimuthal blurring of the reflexes, indicating a high level of internal stresses.

The use of the method of all-round pressing with changing axis of deformation makes it possible to significantly reduce the inhomogeneity of the initial structure. Thus, in [24] during the formation of the UFG structure of a heterogeneous Ti-6Al-4V alloy (Fig. 8, a), a UFG structure in which the  $\beta$ -phase is uniformly distributed throughout the volume is formed after the method of all-round pressing with changing axis of deformation (Fig. 8, b).

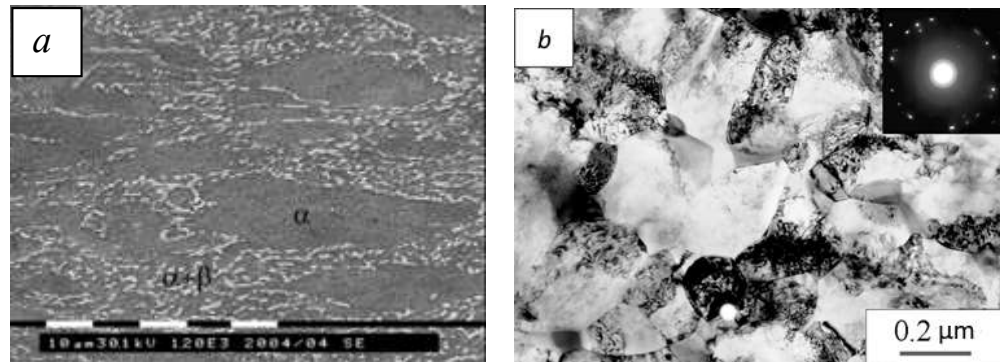


Figure 8 - Microstructure of the Ti-6Al-4V alloy:

a - initial state (a); b - after SPD [24]

The disadvantage of the UFG structure formed by method of all-round pressing with changing axis of deformation is the dependence of the structure homogeneity on the pressing modes. Thus, in [25], when studying the influence of method of all-round pressing with changing axis of deformation modes on the structure of titanium alloy Ti-6Al-4V, it was found that the grain distribution can have a significantly different character (Fig. 9).

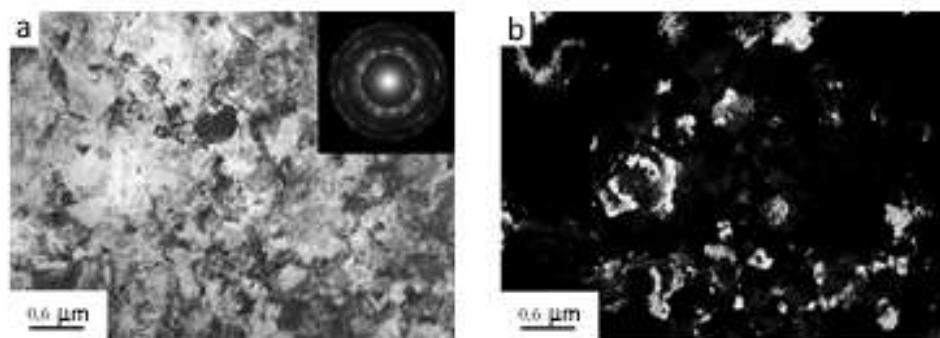


Figure 9 - Electron microscopy image (a, b) of BT6 alloy after method of all-round pressing with changing axis of deformation: a - light-field image; b - dark-field image [25]

As noted above, hydrogen has a significant influence on the deformability of titanium alloys. Thus, in [26] a homogeneous UFG structure was obtained by the method of all-round pressing with changing axis of deformation (Fig. 10) in a pre-hydrogenated VT6 alloy. It was found that the presence of hydrogen reduces the amount of strain required for the formation of the UFG structure in alloy VT6 by (2 - 3) times.

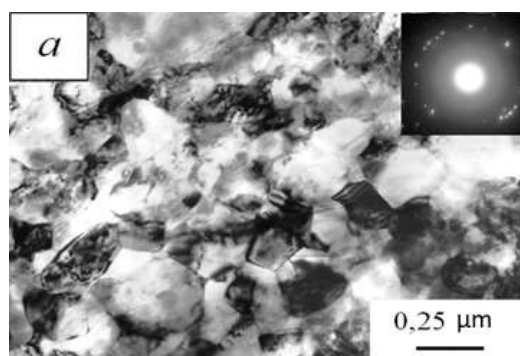


Figure 10 - Microstructure (a) and histogram of grain size distribution (b) of Ti-6Al-4V alloy obtained by the method combining reversible hydrogen alloying and SPD [26]

The study of the UFG structure of the titanium alloy Ti-6Al-4V before and after the anaporization is devoted to [27]. In the process of pressing in the titanium

alloy Ti-6Al-4V the grain-grain structure is formed with the average size of the elements  $d = 0.29 \mu\text{m}$  (Fig. 11). It is established that the formation of the UFG structure in the alloy leads to an insignificant increase in the volume fraction of the  $\beta$ -phase (up to 5 vol.%).

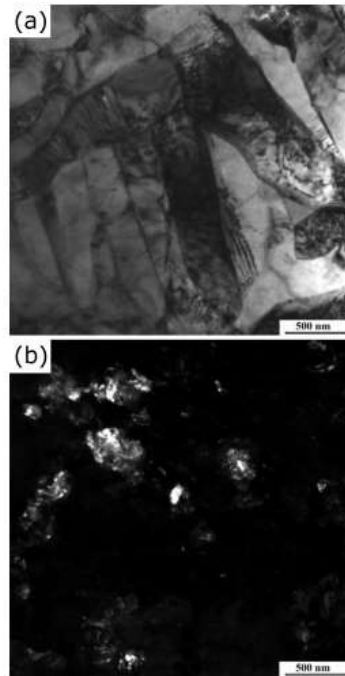


Figure 11 - Electron microscopic image of the alloy Ti-6Al-4V:

a - light-field image of EBM alloy Ti-6Al-4V,

b - dark-field image of UFG alloy Ti-6Al-4V [27]

The influence of hydrogen on the structural-phase state of the UFG titanium alloy of the Ti-6Al-4V system obtained by SPD with a change in the deformation axis and a gradual decrease in temperature (873 - 853) K was studied in [28]. It was found that after pressing in the alloy formed non-equilibrium grain-subgrain UFG structure with an average element size  $0.29 \mu\text{m}$ . In the presence of hydrogen  $\sim 0.05$  wt. % in the alloy an increase in the volume fraction and its lattice parameter of  $\beta$ -phase is observed. It was also found that in the Ti-6Al-4V titanium alloy in the UFG state after hydrogenation the main type of defects are dislocations, and with increasing hydrogen concentration the number of such defects increases.

Thus, the above data demonstrate that the use of severe plastic deformation methods allows to form the ultrafine grained state in titanium and its alloys, the dispersity and homogeneity of which depend on both the methods and the mode of deformation. Also intensive plastic deformation leads not only to a refinement of structural elements, but also to phase transitions. This can be used purposefully to obtain an ultrafine-grained structure with the desired phase composition.